

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR
HASSANIA BAIBANOU

COMMANDE D'UNE CHARGE MÉCANIQUE PROGRAMMABLE
POUR L'ÉMULATION DE CHARGES INDUSTRIELLES DE
MOTEUR

Août 2003

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

RÉSUMÉ

L'émulation par charge mécanique programmable d'une charge industrielle requiert en général la modélisation des propriétés de l'inertie et de frottement. Il est nécessaire de définir une loi de commande qui permet de compenser directement ou indirectement la dynamique du système. L'objectif principal de ce travail est de concevoir et réaliser un système dynamique qui permettra de simuler mécaniquement des charges motrices.

La stratégie de commande est conçue pour réaliser une charge mécanique programmable de haute performance pour des charges industrielles typiques, en imposant des caractéristiques de la charge désirée avec des couplages différents flexibles/rigides.

Les lois de commande de l'émulateur de charge sont développées dans l'environnement MATLAB/SIMULINKTM. Dans la première étape nous avons utilisé des modèles linéaires alors que pour valider nous avons employé des modèles complets du Power System Blockset (PSB) et les blocs de SIMUPELS. Cependant les variations des paramètres de la charge permettent de valider un certain degré de robustesse des lois de commande.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, le professeur Pierre Sicard, pour ses conseils et son encadrement sans limites tout au long de ce travail ainsi que pour son soutien financier lors de mes études.

Je tiens à remercier mon co-directeur Abdellfattah Ba-Razzouk pour ses conseils et son assistance durant ce travail.

Je remercie mes collègues pour leur collaboration, particulièrement mes collègues du laboratoire de commande, ainsi que tous les membres de la Chaire de recherche Hydro-Québec sur la Puissance et l'Energie Électrique.

Je remercie sincèrement tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à ce travail, et qui m'ont aidé à surmonter moralement les nombreuses difficultés survenues au cours de ces années.

Je profite de cette occasion, pour remercier les membres de ma famille, mes parents qui m'ont apporté un soutien moral ainsi que financier, mes sœurs, mon frère et mon mari, pour ses précieux conseils.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
REMERCIEMENTS	ii
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES SYMBOLES	xii
LISTE DES ABRÉVIATIONS	xiv
CHAPITRE I : INTRODUCTION	1
1.1. Problématique d'émulation dynamique de charges motrices	1
1.2. Objectifs	2
1.3. Méthodologie	3
1.4. Structure du mémoire	4
CHAPITRE II : ÉMULATION DE CHARGES MOTRICES	6
2.1. Émulation de charges motrices	7
2.2. Modèle des charges motrices	8
2.2.1. Charges actives	9
2.2.2. Charges passives	9
2.3. Cas typiques d'émulation de la charge et structure	10
2.3.1. Couplage rigide-rigide	11
2.3.2. Couplage rigide- flexible	12
2.3.3. Couplage flexible- rigide	14
2.3.4. Couplage flexible-flexible	14
2.4. Approches de commande	16

2.4.1. Commande en boucle ouverte	16
2.4.2. Commande en boucle fermée	17
2.5. Conclusions	18
CHAPITRE III : MODÈLES DYNAMIQUES DE LA CHARGE MÉCANIQUE PROGRAMMABLE ET DE LA CHARGE	19
3.1. Modèles linéaires.....	20
3.1.1. Cas rigide	20
3.1.2. Cas flexible.....	25
3.2. Modèles complets sous Power System Blockset (PSB)	27
3.3. Utilisation des modèles	31
3.4. Conclusions	34
CHAPITRE IV : DÉVELOPPEMENT DES LOIS DE COMMANDE DE LA CHARGE MÉCANIQUE PROGRAMMABLE.....	36
4.1. Couplage rigide-rigide (RR)	37
4.2. Couplage flexible-rigide (FR)	42
4.3. Couplage rigide-flexible (RF)	46
4.4. Couplage flexible-flexible (FF).....	52
4.5. Conclusions	56
CHAPITRE V : RÉSULTATS DE SIMULATION DE LA CHARGE MÉCANIQUE PROGRAMMABLE	57
5.1. Simulation sous Power System Blockset	57
5.1.1. Couplage rigide-rigide (RR).....	58

5.1.2. Couplage flexible-rigide (FR).....	63
5.1.3 Couplage rigide-flexible (RF).....	66
5.1.4. Couplage flexible-flexible (FF).....	70
5.2. Effets de la variation des paramètres de la charge	73
5.3. Conclusions	78
CHAPITRE VI : CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS	79
RÉFÉRENCES	82
ANNEXES	84
ANNEXE A : Schémas et programmes de simulation des modèles linéaires dans les cas rigide et flexible dans l'environnement Matlab® et Simulink™	85
ANNEXE B : Schémas et programmes de simulation des modèles non linéaires dans les cas rigide et flexible sur PSB.....	91
ANNEXE C : Schémas et programmes de simulation du système Rigide-Rigide (RR) sur Simulink™, Matlab® et PSB.....	98
ANNEXE D : Schémas et programmes de simulation du système Flexible-Rigide (FR) sur Simulink™, Matlab® et PSB.....	110
ANNEXE E : Schémas et programmes de simulation du système Rigide-Flexible (RF) sur Simulink™, Matlab® et PSB	124
ANNEXE F : Schémas et programmes de simulation du système Flexible-Flexible (FF) sur Simulink™, Matlab® et PSB	135

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Schéma général d'une charge mécanique programmable.....	8
Figure 2.2 : Schéma bloc du système physique avec l'émulateur de charges.....	10
Figure 2.3 : Modèle du système rigide-rigide	11
Figure 2.4 : Modèle du système rigide avec la charge désirée.....	12
Figure 2.5 : Modèle du système rigide- flexible	13
Figure 2.6 : Modèle du système flexible avec la charge désirée.....	13
Figure 2.7 : Modèle du système flexible- rigide	14
Figure 2.8 : Modèle du système flexible- flexible.....	15
Figure 2.9 : Modèle du système flexible avec la charge désirée.....	15
Figure 2.10 : Stratégie de commande pour l'émulateur de charges en boucle ouverte.....	17
Figure 2.11 : Stratégie de commande pour l'émulateur de charges en boucle fermée	18
Figure 3.1 : Schéma bloc du système physique avec un couplage rigide	20
Figure 3.2 : Schéma bloc SIMULINK du système physique avec un couplage rigide.....	22
Figure 3.3 : Régulateur de vitesse PID.....	23
Figure 3.4 : Schéma général d'un système linéaire rigide avec le régulateur de vitesse	25
Figure 3.5 : Schéma bloc d'un système physique avec un couplage flexible	25
Figure 3.6 : Modèle du système physique avec un couplage flexible.....	26
Figure 3.7 : Schéma général du système physique qui présente un couplage flexible avec régulateur de vitesse	27
Figure 3.8 : Modèle PSB d'un entraînement CA à commande vectorielle	28
Figure 3.9 : Modèle PSB d'un système physique avec couplage flexible	29
Figure 3.10 : Modèle PSB/SIMUPELS d'un système physique avec couplage rigide.....	30

Figure 3.11 : Vitesse de consigne pour les modèles linéaires et non-linéaires	31
Figure 3.12 : Erreur de vitesse pour un couplage rigide : modèle linéaire.....	32
Figure 3.13 : Erreur de vitesse pour un couplage flexible : modèle linéaire.....	32
Figure 3.14 : Erreur de vitesse pour un couplage rigide : modèle PSB	33
Figure 3.15 : Erreur de vitesse pour un couplage flexible : modèle de PSB.....	34
Figure 4.1 : Schéma bloc de l'émulateur de charge pour un couplage RR	38
Figure 4.2 : Schéma général du système RR, modèle linéaire	39
Figure 4.3 : Système physique avec couplage rigide sans émulateur avec régulation de vitesse, modèle linéaire	39
Figure 4.4 : Couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle linéaire (RR)	41
Figure 4.5 : Erreur de couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle linéaire (RR)	41
Figure 4.6 : Schéma de l'émulateur de charge pour un couplage FR	44
Figure 4.7 : Schéma général du système FR, modèle linéaire	44
Figure 4.8 : Couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle linéaire (FR)	45
Figure 4.9 : Erreur de couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle linéaire (FR)	46
Figure 4.10 : Schéma de l'émulateur de charge pour le couplage RF	48
Figure 4.11 : Schéma général du système RF, modèle linéaire	49
Figure 4.12 : Système physique avec couplage flexible sans émulateur, modèle linéaire.....	49
Figure 4.13 : Couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle linéaire (RF)	51
Figure 4.14 : Erreur de couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle linéaire (RF)	51
Figure 4.15 : Schéma de l'émulateur de charge pour le couplage FF	54

Figure 4.16 : Schéma général du système FF, modèle linéaire	54
Figure 4.17 : Couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle linéaire (FF).....	55
Figure 4.18 : Erreur de couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle linéaire (FF)	56
Figure 5.1 : Schéma de l'émulateur de charge pour le couplage RR, modèle PSB	59
Figure 5.2 : Schéma général du système RR, modèle PSB	59
Figure 5.3 : Schéma d'un système physique avec couplage rigide sans émulateur, modèle PSB ..	60
Figure 5.4 : Couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle PSB (RR).....	61
Figure 5.5 : Erreur de couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle PSB (RR)..	62
Figure 5.6 : Schéma général du système FR, modèle PSB	63
Figure 5.7 : Couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle PSB (FR)	64
Figure 5.8 : Erreur de couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle PSB (FR) ..	65
Figure 5.9 : Schéma général du système RF, modèle PSB	66
Figure 5.10 : Schéma physique avec couplage flexible sans émulateur, modèle PSB/SIMUPELS	67
Figure 5.11. Couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle PSB (RF)	68
Figure 5.12 : Erreur de couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle PSB/SIMUPELS (RF).....	69
Figure 5.13 : Schéma général du système FF, modèle PSB.....	70
Figure 5.14 : Couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle PSB (FF).....	71
Figure 5.15 : Erreur de couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle PSB (FF)..	72
Figure 5.16 : Couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle PSB (FR), avec une diminution de 50% de la charge	74

Figure 5.17 : Erreur de couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle PSB (FR) avec une diminution de 50% de la charge.....	75
Figure 5.18 : Couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle PSB (FR), avec une augmentation de 50% de la charge.....	76
Figure 5.19 : Erreur de couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle PSB (FR) avec une augmentation de 50% de la charge.....	77
Figure A.1 : Modèle de système rigide dans le bloc DEE	86
Figure A.2 : Régulateur de vitesse PI.....	86
Figure A.3 : Modèle de régulateur modifié.....	87
Figure A.4 : Modèle de régulateur de vitesse PI dans Simulink	87
Figure A.5 : Modèle de système flexible dans le bloc DEE	88
Figure B.1 : Source de courant avec redresseur	93
Figure B.2 : Source de courant alternatif	94
Figure B.3 : Orientation de flux dans PSB.....	95
Figure B.4 : Modèle de la charge	96
Figure B.5 : Modèle du moteur DQ dans SIMUPELS.....	97
Figure C.1 : Émulateur de charge du système RR, modèle linéaire.....	99
Figure C.2 : Schéma du modèle désiré de l'émulateur de système RR.....	99
Figure C.3 : Schéma du modèle réel de l'émulateur de système RR	100
Figure C.4 : Schéma du filtre dérivatif.....	100
Figure C.5 : Schéma du filtre passe bas	101
Figure C.6 : Schéma du contrôleur proportionnel de l'émulateur de système RR.....	101
Figure C.7 : Paramètres du moteur d'entraînement et de la charge désirée, modèle linéaire RR	102
Figure C.8 : Erreur de vitesse du moteur d'entraînement, modèle linéaire RR	104

Figure C.9 : Schéma du calcul de couple mécanique mesuré, modèle PSB	105
Figure C.10 : Paramètres du moteur d'entraînement et celui de la charge dans le bloc PSB	106
Figure C.11 : Paramètres du moteur d'entraînement et de la charge désirée, modèle PSB	107
Figure C.12 : Erreur de vitesse du moteur d'entraînement, modèle PSB(RR)	109
Figure D.1 : Schéma du modèle désiré de l'émulateur de système FR.....	111
Figure D.2 : Schéma du modèle actuel de l'émulateur de système FR.....	111
Figure D.3 : Schéma du contrôleur PD de l'émulateur de système FR	112
Figure D.4 : Schéma du contrôleur proportionnel de l'émulateur de système FR.....	112
Figure D.5 : Schéma du contrôleur dérivateur de l'émulateur de système FR	113
Figure D.6 : Erreur de vitesse du moteur d'entraînement, modèle linéaire FR	115
Figure D.7 : Erreur de vitesse du moteur d'entraînement, modèle PSB(FR).....	118
Figure D.8 : Erreur de vitesse du moteur d'entraînement, modèle PSB(FR) avec une diminution de 50% de la charge	121
Figure D.9 : Erreur de vitesse du moteur d'entraînement, modèle PSB(FR) avec une augmentation de 50% de la charge.....	123
Figure E.1 : Schéma du modèle désiré de l'émulateur de système RF	125
Figure E.2 : Schéma du modèle réel de l'émulateur de système RF.....	126
Figure E.3 : Schéma du contrôleur proportionnel de l'émulateur de système RF	126
Figure E.4 : Paramètres du moteur d'entraînement et de la charge désirée, modèle linéaire RF.	127
Figure E.5 : Erreur de vitesse du moteur d'entraînement, modèle linéaire RF	129
Figure E.6 : Schéma de l'émulateur de charge pour le couplage RF, modèle PSB	130
Figure E.7 : Paramètres du moteur d'entraînement, modèle PSB.....	131
Figure E.8 : Paramètres de la charge désirée, modèle PSB.....	132
Figure E.9 : Erreur de vitesse du moteur d'entraînement, modèle PSB (RF)	134

Figure F.1 : Schéma du modèle réel et du modèle désiré de l'émulateur du système FF	136
Figure F.2 : Schéma du modèle désiré de l'émulateur du système FF.....	137
Figure F.3 : Schéma du modèle réel de l'émulateur du système FF	137
Figure F.4 : Schéma du contrôleur PD de l'émulateur du système FF	137
Figure F.5 : Paramètres du moteur d'entraînement et de la charge désirée, modèle linéaire FF .	138
Figure F.6 : Erreur de vitesse du moteur d'entraînement, modèle linéaire FF	140
Figure F.7 : Erreur de vitesse du moteur d'entraînement, modèle PSB (FF).....	143

LISTES DES SYMBOLES

a_f : Coefficient du filtre ;

b_f : Coefficient du filtre ;

F : Coefficient de frottement visqueux;

J : Moment d'inertie ;

k : Coefficient de rigidité du ressort de torsion;

k_l : Coefficient de rigidité désirée du ressort de torsion;

K_i : Gain intégrateur;

K_d : Gain dérivateur;

K_p : Gain proportionnel;

K_{pp} : Gain proportionnel;

T_C : Couple mécanique;

T_e : Couple électromagnétique de la charge;

T_{eLd} : Couple électromagnétique désiré de la charge;

T_{fb} : Couple de rétroaction;

w : Pulsation de coupure;

θ : Position;

$\dot{\theta}$: Vitesse;

$\ddot{\theta}$: Accélération;

\bullet_c : Grandeur reliée à la charge;

\bullet_{cl} : Grandeur reliée à la charge désirée;

\bullet_M : Grandeur reliée au moteur d'entraînement;

- _{mes} : Grandeur mesurée;
- _T : Grandeur totale;
- _{T1} : Grandeur totale désirée;
- ^{*} : Grandeur désirée;
- [~] : Grandeur filtrée.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

PSB : Power System Blockset ;

C.F.O : Commande à flux orienté;

PID : Proportionnel intégral dérivé;

PI : Proportionnel intégral;

PD : Proportionnel dérivé;

RR : rigide-rigide;

RF : rigide-flexible;

FR : flexible-rigide;

FF : flexible-flexible.

CHAPITRE I :

INTRODUCTION

1.1. Problématique d'émulation dynamique de charges motrices :

L'étude des systèmes d'entraînement est réalisée par simulation et expérimentalement. Bien que la simulation numérique possède de nombreux avantages (coût, rapidité de conception, etc..), l'expérimentation n'en demeure pas moins essentielle pour valider le fonctionnement des équipements. Cependant la disponibilité des charges et l'étude en présence de variations de paramètres de la charge sont souvent problématiques. La simulation hybride ou avec matériel dans la boucle [1] est une solution efficace à ce problème. La plupart des charges de moteurs utilisées dans les laboratoires sont des charges passives inertielles (masses tournantes) qui ne permettent d'étudier que certains aspects de leur fonctionnement. Dans la pratique, les charges sont fréquemment des charges actives et/ou non linéaires, par exemple, les pompes, les ventilateurs, les robots [2,3].

Pour étudier le régime de démarrage, le comportement des entraînements à vitesse variable en présence de fautes (coupure d'alimentation, pertes d'une phase, etc.....) et l'interaction entre le réseau et le système d'entraînement, une charge de laboratoire devrait en principe reproduire le comportement dynamique aussi bien en régime transitoire qu'en régime permanent de la charge réelle. Cette charge devra donc reproduire un comportement très proche de la réalité dans le but de mieux concevoir et optimiser le système d'entraînement à vitesse variable. Ceci permettra également de valider l'efficacité des algorithmes de commande développés dans des conditions plus réalistes.

Une charge dynamique peut être réalisée à l'aide d'une machine électrique commandée par un convertisseur de puissance en boucle fermée qui constituera ainsi une charge mécanique programmable. L'exemple que nous considérons est celui de reproduire le comportement de charges industrielles typiques comme les pompes, les ventilateurs et les robots, à l'aide d'une charge mécanique programmable qui sera couplée mécaniquement à un système d'entraînement. Il faudrait donc déterminer le modèle de ce système ainsi que sa loi de commande afin de réaliser le comportement dynamique de la charge simulée [4].

1.2. Objectifs :

L'objectif principal de ce travail de recherche est de concevoir un système qui permettra de simuler mécaniquement des charges motrices. Pour ce faire, nous déterminerons une stratégie de commande, visant la réalisation d'une charge mécanique programmable de haute performance pour l'émulation de charges industrielles typiques. Nous modéliserons et simulerons la charge mécanique programmable et sa loi de commande avec des modèles linéaires et non linéaires. Les caractéristiques désirés et les différents types de couplages entre la charge mécanique

programmable et le moteur d'entraînement seront pris en compte. Ce travail se limitera aux charges inertielles avec friction visqueuse.

1.3. Méthodologie :

L'émulation de charges industrielles par une charge mécanique programmable requiert en général la modélisation des propriétés effectives de l'inertie et du frottement du groupe moteur-charge et possiblement l'introduction de non-linéarités, dynamiques ou autres. Ainsi il est nécessaire de définir une loi de commande efficace qui permettra de compenser, directement ou indirectement, la dynamique naturelle du système pour imposer un nouveau comportement [5]. Une loi de commande numérique est envisagée pour accomplir ceci. La première étape de ce travail est la recherche bibliographique dans le domaine, qui nous permettra de développer les modèles de charges linéaires ou non linéaires, ainsi que la loi de commande proposée pour la charge mécanique programmable.

La modélisation et l'identification des paramètres d'une charge mécanique programmable seront nécessaires pour la conception du contrôleur. Cette dernière est généralement basée sur des hypothèses simplificatrices qui compromettent la qualité de la charge mécanique programmable. Il s'agira donc de définir une loi de commande qui possédera certaines propriétés de robustesse, ainsi que de hautes performances dynamiques pour une structure générique du modèle des charges industrielles. La qualité de la loi d'émulation sera vérifiée en comparant principalement le couple électromagnétique du moteur d'entraînement obtenu (i) avec la charge désirée réelle et (ii) avec la charge désirée émulée. Cette mesure est beaucoup plus sensible que la comparaison des vitesses des moteurs électriques. Les erreurs relatives seront principalement analysées. La

robustesse vérifiée sera une robustesse à un changement des caractéristiques désirées pour la charge dynamique.

Ensuite, l'émulateur sera développé dans l'environnement MATLAB®/SIMULINK, de même que les modèles linéaires du système d'entraînement pour permettre de syntoniser rapidement les gains des correcteurs. Ensuite une validation par les modèles non linéaires de Power Systems Blockset (PSB) [6] et les blocs de la librairie SIMUPELS [7] sera réalisée, pour mieux analyser les performances dynamiques des lois de commande conçues avec des modèles simplifiés.

1.4. Structure du mémoire :

Il est proposé de développer une loi de commande pour un système d'émulation de charges industrielles. Le système devra être stable et robuste vis à vis des variations de la charge. De plus, la charge mécanique programmable doit avoir de bonnes performances dynamiques.

Ce mémoire est organisé de la façon suivante.

Le chapitre II présente une étude sur l'émulation de charges industrielles de moteurs et décrit le besoin de l'émulateur ainsi que la synthèse des avancées dans ce domaine de recherche. Il présente également différents modèles de charges industrielles. Les différents types d'émulateurs de charges et la structure traitée dans ce mémoire sont ensuite présentés, suivis de l'approche de commande utilisée.

Le chapitre III décrit le modèle de la charge mécanique programmable dans le cas d'un couplage rigide et flexible, les modèles linéaires développés pour le schéma de commande de l'émulateur ainsi que les modèles détaillés de PSB qui sont utilisés pour la validation de la loi de commande. Une discussion sur les modèles traités auparavant est présentée.

Le chapitre IV présente le développement des lois de commande de la charge mécanique programmable pour les différentes structures proposées dans le chapitre II. Les modèles linéaires sont utilisés pour la conception des lois de commande. Une simulation de ces modèles est présentée tout au long de ce chapitre.

Le chapitre V présente les résultats des simulations réalisées avec les modèles PSB pour la validation des stratégies de commande proposées au chapitre IV. Quelques tests sur l'effet des variations des paramètres de la charge font également l'objet de ce chapitre.

Le chapitre VI consiste en une discussion des résultats et une présentation de la contribution du travail de recherche. Quelques recommandations sont finalement proposées pour les travaux ultérieurs. Une conclusion générale clôture ce mémoire de maîtrise.

CHAPITRE II :

ÉMULATION DE CHARGES MOTRICES

La conception des moteurs et des systèmes d'entraînement à vitesse variable destinés aux applications industrielles fait de plus en plus appel à des charges programmables, précises et robustes, qui permettent d'avoir une bonne émulation du processus auquel ils seront intégrés. Les charges de moteurs sont fréquemment des charges actives et/ou non linéaires. Dans les laboratoires, la plupart des charges sont des charges passives, statiques et inertielles qui ne permettent d'étudier que certains aspects de leur fonctionnement [5].

L'étude du comportement des entraînements à vitesse variable en présence de défauts, tels que la coupure d'alimentation, la perte d'une phase, ainsi que l'interaction entre le réseau et le système d'entraînement nécessite une charge de laboratoire capable de reproduire le plus fidèlement possible la charge réelle qu'entraînera le moteur sous test. Une charge de laboratoire devrait donc reproduire le comportement dynamique aussi bien en régime transitoire qu'en régime permanent

de la charge réelle dans le but de mieux concevoir et optimiser le système d'entraînement à vitesse variable.

2.1. Émulation des charges motrices

L'émulation de charges industrielles est utilisée afin de reproduire les caractéristiques de la charge aussi bien en régime statique qu'en régime dynamique. Une émulation de charge peut être réalisée à l'aide d'une machine électrique commandée par un convertisseur de puissance en boucle fermée, constituant ainsi une charge mécanique programmable [4,5].

Une charge mécanique programmable est proposée afin de reproduire le comportement de charges industrielles typiques. Ce qui n'est pas pratique, c'est d'avoir tous les types de charges industrielles dans un laboratoire. Cela justifie la pertinence d'une charge mécanique programmable pour émuler les charges et reproduire le comportement d'une charge réelle, dans le but de valider expérimentalement les techniques avancées de commande des entraînements électriques [1].

Une charge mécanique programmable performante doit être capable de reproduire le comportement de la charge aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire, pour des charges linéaires, non linéaires et éventuellement discontinues. Ce dispositif permettra de valider le système de commande d'un entraînement à vitesse variable et d'avoir une bonne performance dans la mesure des caractéristiques de la charge telles que le couple, la vitesse, les pertes de puissance et l'efficacité, qui devront ressembler aux caractéristiques d'une charge réelle [1].

Une charge mécanique programmable peut être représentée comme nous le montre la figure 2.1.

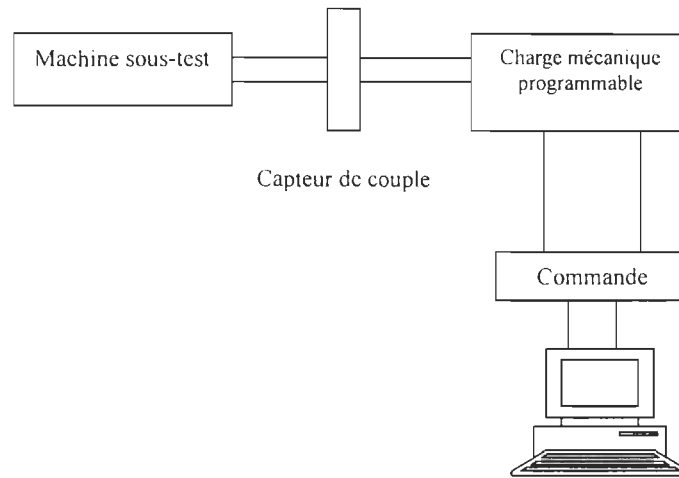


Fig.2.1 : Schéma général d'une charge mécanique programmable

La machine sous-test et la charge mécanique programmable peuvent être couplées avec différents types de couplages : rigide et flexible. La charge mécanique programmable, que nous supposons réaliser avec une machine à courant alternatif, est reliée à un onduleur qui est lui même relié à un calculateur numérique pour imposer les caractéristiques de la charge.

L'émulation des charges industrielles par une charge mécanique programmable requiert la modélisation des propriétés de l'inertie et du frottement de cette charge ainsi que l'identification de ses paramètres.

2.2. Modèle des charges motrices

Les caractéristiques mécaniques d'une machine d'entraînement sont souvent compliquées. Le concepteur de la commande d'un moteur d'entraînement a toujours intérêt à relever expérimentalement cette caractéristique ou à s'adresser au constructeur du moteur. Nous ne cherchons pas ici à reconstituer le modèle complet de moteurs, mais à identifier certaines caractéristiques de leurs charges pour mieux cerner le problème d'émulation. Pour ce, on peut classer ces charges en deux catégories: des charges passives et des charges actives.

2.2.1 Charges actives

Une charge active peut apporter de l'énergie au système. par exemple, dans un système de bobinage, la charge vue par un moteur donné inclut d'autres moteurs qui peuvent injecter de l'énergie dans le système. Une grue dont la masse transportée peut entraîner le moteur d'entraînement en inverse à cause de la force de gravité peut être associée à un autre type de charges actives : c'est une charge qui, en plus de s'opposer aux forces appliquées par le moteur d'entraînement, peut causer un mouvement de ce moteur à cause de son énergie potentielle. Selon la première définition, cette charge n'est cependant pas nécessairement active (elle n'apporte pas nécessairement une nouvelle énergie dans le système, il y a simplement transfert d'énergie potentielle en énergie cinétique lorsque nous analysons le système total). Il est beaucoup plus intéressant de traiter de charges statiques et dynamiques. La caractéristique d'une charge statique est représentée par une fonction indépendante du temps (caractéristique couple-vitesse par exemple). La caractéristique d'une charge dynamique est fonction du temps, ce qui inclut les charges inertielles, avec hystérésis, retour de dent, etc.

2.2.2 Charges passives

C'est une charge qui ne génère aucune énergie, par exemple, une charge inertielle ou avec frottement seulement. C'est un type de charge commune qui englobe beaucoup de cas. On rencontre ce type de charges dans le cas de déroulement et d'enroulement d'un produit (tôle, papier..), les deux tambours étant entraînés par des moteurs différents dont les vitesses doivent être constamment adaptées aux diamètres de ces tambours [8].

Afin d'étudier ce type de charges, on l'émule à l'aide d'une charge mécanique programmable. Cette dernière est contrôlée par une stratégie de commande qui doit être efficace et qui permettra de compenser directement ou indirectement la dynamique naturelle du système pour imposer un comportement désiré.

2.3. Cas typiques d'émulation de la charge et structure

L'émulation de charges dynamiques vise le développement de lois de commande conçues pour reproduire le comportement d'un couplage rigide ou flexible dans le système physique et imposer des caractéristiques désirées à la charge mécanique programmable. Les cas que nous considérons sont ceux ayant pour but de reproduire le comportement de charges industrielles typiques à l'aide d'une charge mécanique programmable qui sera couplée mécaniquement à un système d'entraînement. Il faudra déterminer le modèle du système ainsi que sa loi de commande afin de réaliser le comportement dynamique de la charge simulée. Le système d'émulation de charges dynamiques que nous étudions est montré à la figure 2.2.

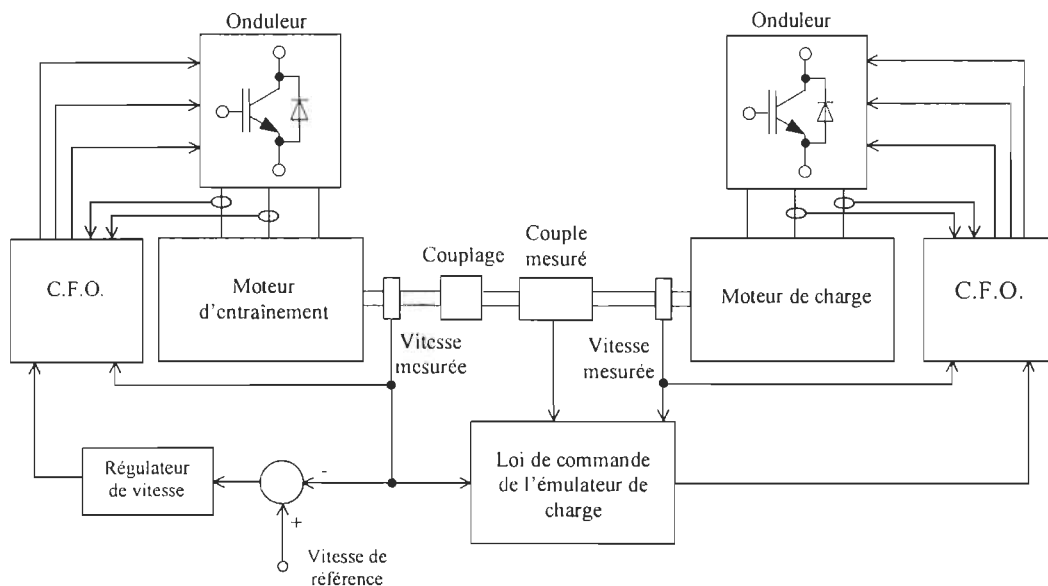


Fig.2.2 : Schéma bloc du système physique avec l'émulateur de charges

La charge mécanique programmable est couplée au moteur d'entraînement avec des coupleurs rigides ou flexibles, ce qui nous amène à quatre possibilités de problèmes qui seront traités en détail par la suite.

2.3.1. Couplage rigide- rigide

Le moteur d'entraînement a un couplage rigide avec la charge émulée et le système physique présente lui-même un couplage rigide. De plus, nous imposons les caractéristiques désirées à la charge mécanique programmable. Ceci nous permet de simuler un système rigide avec un autre système rigide doté de caractéristiques différentes (inertie et frottement). La figure 2.3 présente le schéma d'un système rigide- rigide.

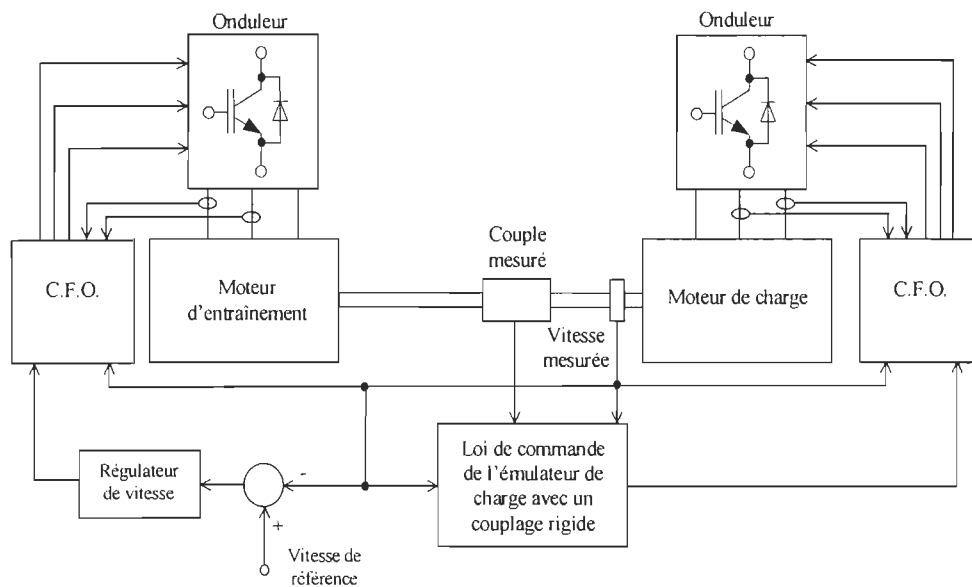


Fig.2.3 : Modèle du système rigide-rigide

Dans ce système RR, le modèle visé est un système avec couplage rigide et caractéristiques de la charge désirée comme illustré à la figure 2.4.

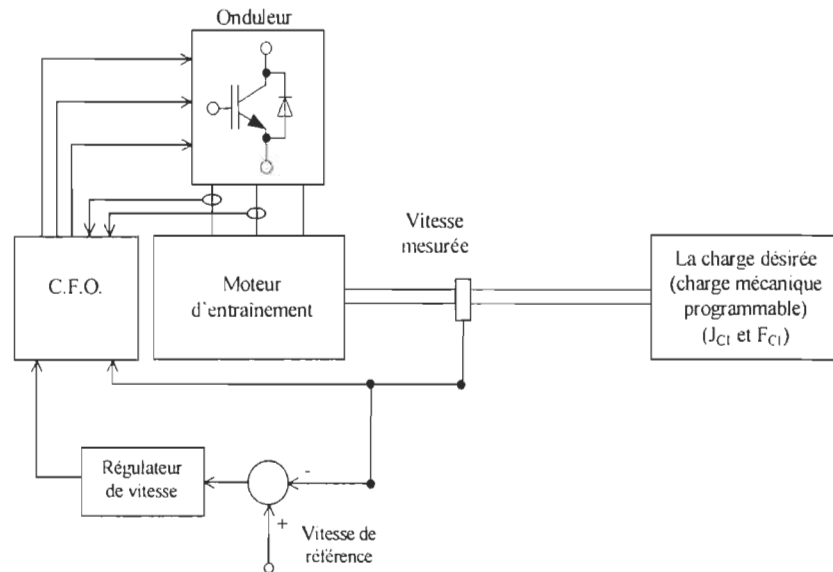


Fig.2.4 : Modèle du système rigide avec la charge désirée

2.3.2. Couplage rigide- flexible

Le moteur d'entraînement a un couplage flexible avec la charge émulée mais le système physique présente un couplage rigide. De plus, on impose les caractéristiques désirées à la charge mécanique programmable.

La figure 2.5 présente le schéma d'un système physique ayant un couplage rigide avec la charge et de l'émulateur de charge avec un couplage flexible.

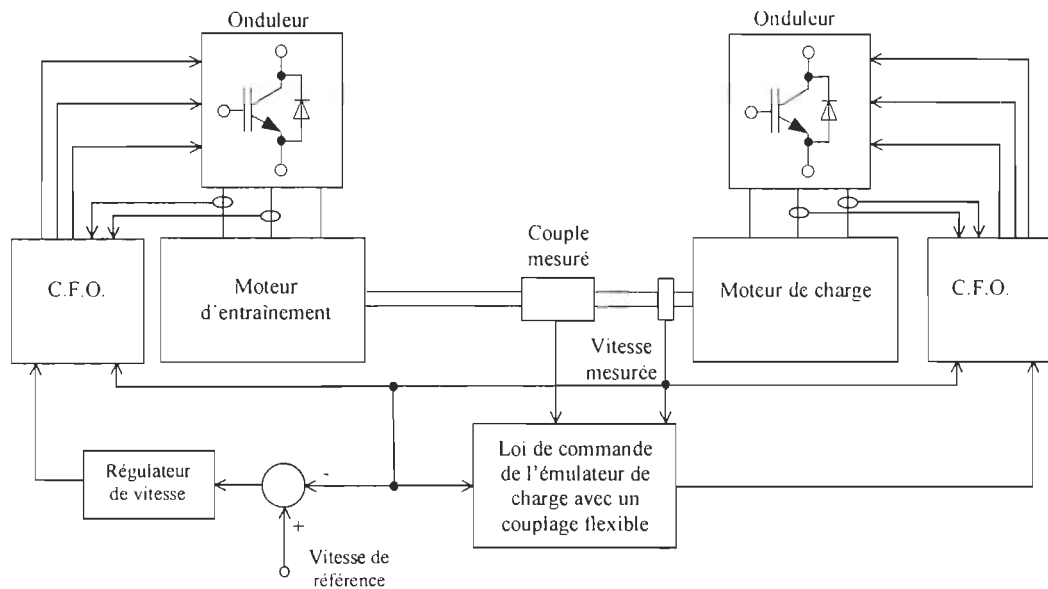


Fig.2.5 : Modèle du système rigide- flexible

Nous visons un système physique avec un couplage flexible et des caractéristiques de la charge désirée dont la configuration est présentée à figure 2.6.

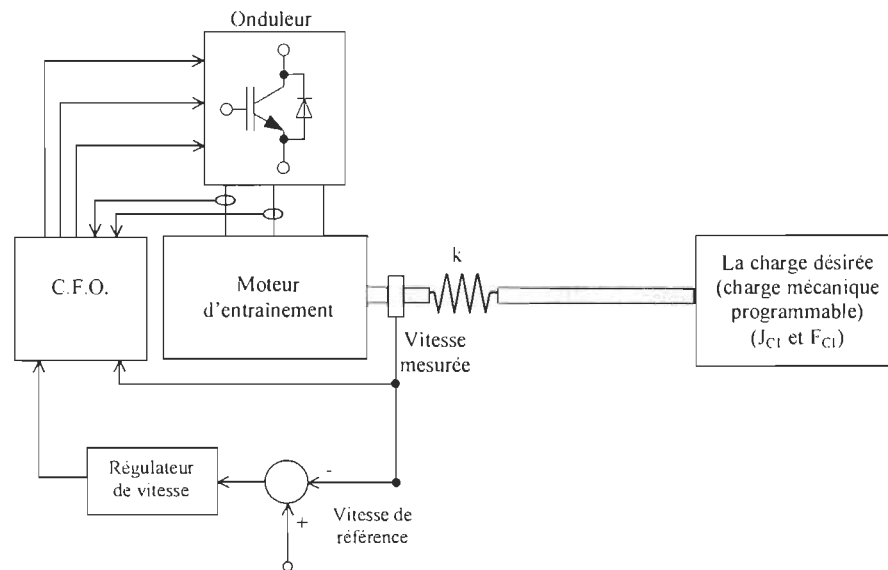


Fig.2.6 : Modèle du système flexible avec la charge désirée

2.3.3. Couplage flexible-rigide

Le moteur d'entraînement a un couplage rigide avec la charge émulée mais le système physique présente un couplage flexible. De plus on impose les caractéristiques désirées à la charge mécanique programmable.

La figure 2.7 présente le schéma d'un système physique ayant un couplage flexible avec la charge et l'émulateur de charge avec un couplage rigide.

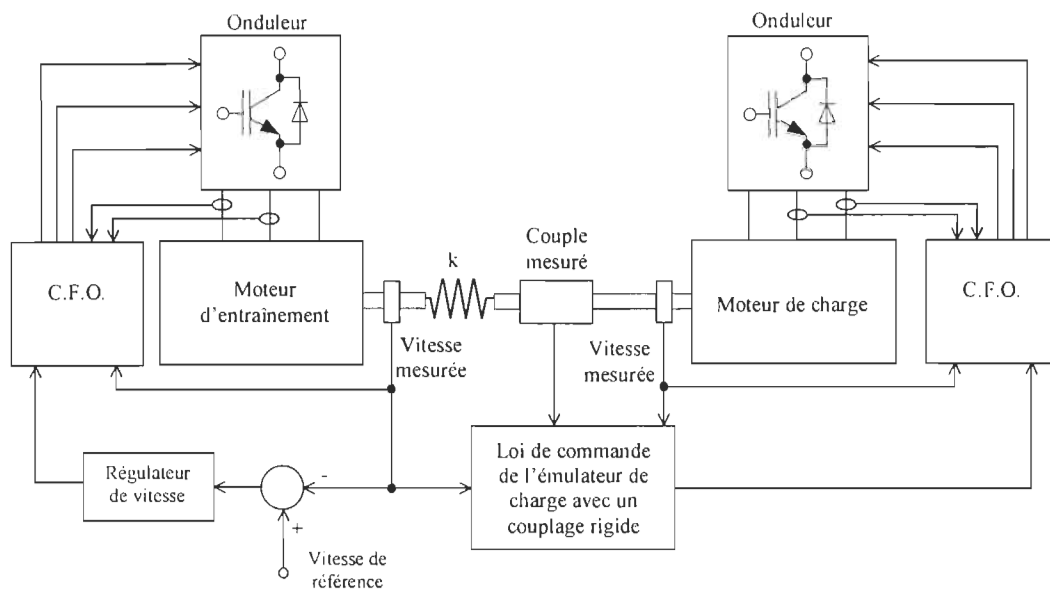


Fig.2.7 : Modèle du système flexible- rigide

Dans ce système FR, le modèle visé c'est un système avec couplage rigide et caractéristique de la charge désirée comme illustre à la figure 2.4.

2.3.4. Couplage flexible-flexible

Le moteur d'entraînement a un couplage flexible avec la charge émulée alors que le système physique présente une flexibilité telle que la constante de flexibilité de l'émulateur est différente

de celle du système physique. De plus nous imposons les caractéristiques désirées à la charge mécanique programmable. Le système flexible-flexible est présenté dans la figure 2.8.

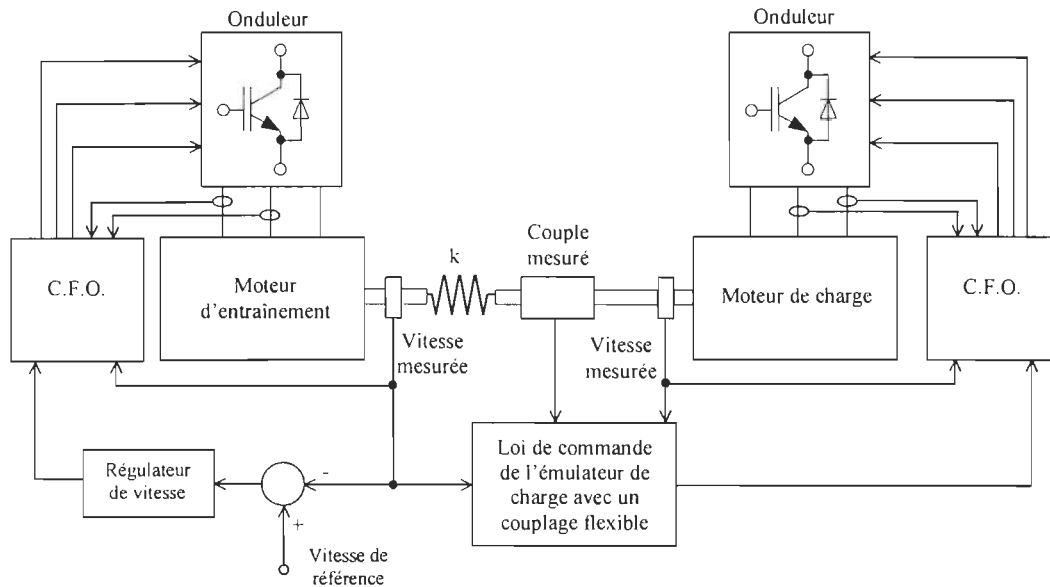


Fig.2.8 : Modèle du système flexible- flexible

Nous visons un système physique avec couplage flexible, caractéristiques de la charge désirée et une constante de flexibilité désirée, la configuration est présentée à la figure 2.9.

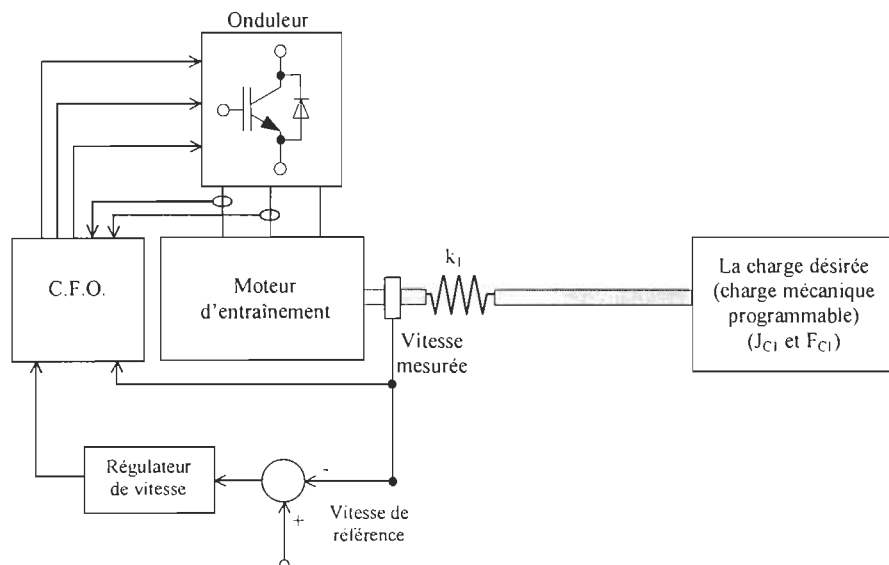


Fig.2.9 : Modèle du système flexible avec la charge désirée

2.4. Approche de commande

L'approche de commande utilisée pour l'émulateur de charge est basée sur la mesure du couple mécanique de l'arbre. Nous proposons deux types de lois de commande, une commande en boucle ouverte (commande anticipatrice) et une commande en boucle fermée (commande en rétroaction). Ces stratégies de commande doivent reproduire le comportement d'une charge réelle, tout en étant efficaces et robustes [5,9,10].

2.4.1. Commande en boucle ouverte

Il s'agit d'une commande anticipatrice qui apporte une action corrective avant que la variable réglée ne dévie de son point de consigne, ce qui peut causer une instabilité dans le système [11, 12].

Cette stratégie de commande, présentée à la figure 2.10, est basée sur le calcul du couple mécanique désiré T^*_c , à partir du modèle de la charge désirée et de la vitesse du moteur d'entraînement. Le couple T^*_c sert à obtenir le couple électromagnétique désiré T^*_{eC} de la charge mécanique programmable à partir du modèle de la charge réelle (la charge mécanique programmable avec le couplage réel) et de la vitesse mesurée de la charge mécanique programmable. Dans le cas d'un couplage rigide, les vitesses du moteur sous test et de l'émulateur sont égales.

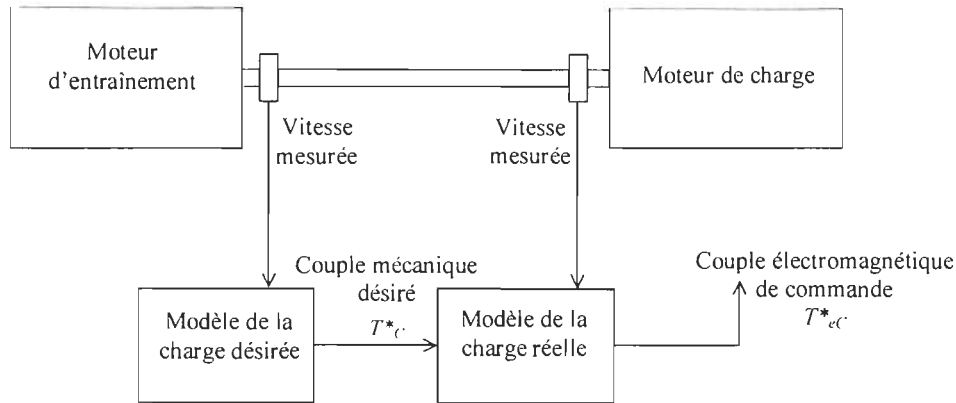


Fig.2.10 : Stratégie de commande pour l'émulateur de charges en boucle ouverte

2.4.2. Commande en boucle fermée

Une boucle de rétroaction est ajoutée au schéma de commande anticipatrice présentée à la figure 2.10. Cette boucle agit sur l'erreur entre le couple mécanique désiré et le couple mécanique mesuré, ce qui apporte une action correctrice pour compenser l'erreur dans la charge réelle. Le modèle de la charge réelle est employé pour obtenir une large bande passante pour l'émulateur et les petites erreurs sont compensées à l'aide des gains du contrôleur [11,12]. Le couple électromagnétique désiré de la charge mécanique programmable est obtenu à partir de la différence entre le couple électromagnétique calculé à l'aide du modèle de la charge réelle et le couple produit à partir du contrôleur comme nous le montre la figure 2.11.

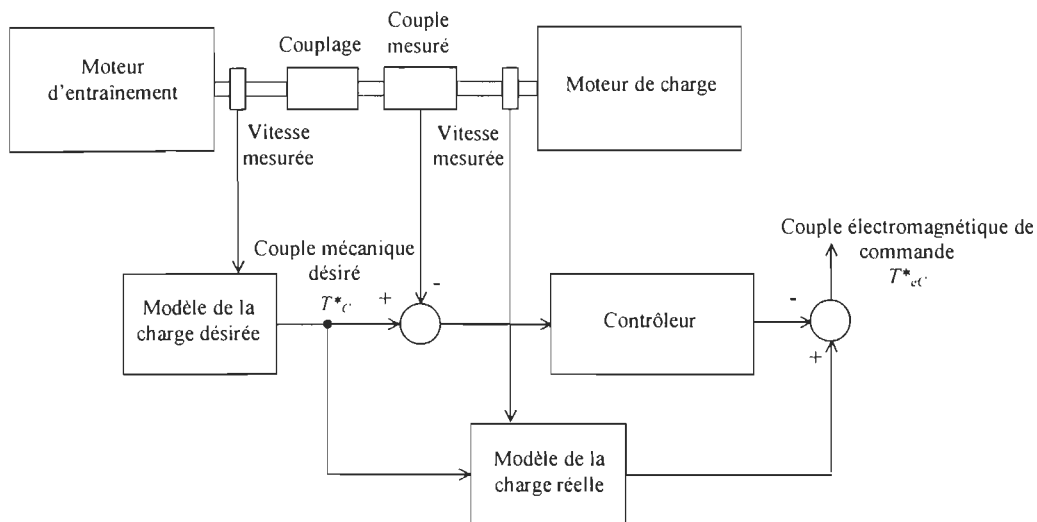


Fig.2.11 : Stratégie de commande pour l'émulateur de charges en boucle fermée

2.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents cas de couplage qui seront traités par la suite dans ce mémoire, ainsi que les approches de commande qui seront étudiées. Nous présenterons dans le chapitre suivant les équations des différents systèmes rigides et flexibles et nous développerons les modèles de simulation linéaires et non-linéaires qui sont implantés à l'aide de PSB. Une application utilisant des modèles linéaires et des modèles PSB sera également détaillée.

CHAPITRE III :

MODÈLES DYNAMIQUES DE LA

CHARGE MÉCANIQUE

PROGRAMMABLE

La modélisation et l'identification des paramètres d'une charge mécanique programmable seront nécessaires pour la conception du contrôleur. Cette dernière est souvent basée sur des hypothèses simplificatrices qui compromettent la qualité de la charge mécanique programmable.

Il s'agira donc de définir les modèles linéaires et non-linéaires de PSB pour un couplage rigide et flexible. Les modèles non linéaires sont ceux qui décrivent de la façon la plus complète le comportement du système et incluent le modèle complet des moteurs, ainsi que leur loi de commande. Ces modèles seront employés pour la validation des résultats. Cependant, nous

présenterons d'abord les modèles linéaires qui sont essentiellement obtenus en exploitant le modèle équivalent des moteurs et de leur loi de commande par orientation de flux, soit un simple modèle linéaire de premier ordre dans le cas d'une charge inertielle avec frottement visqueux.

3.1. Modèles linéaires

Les modèles linéaires sont utilisés pour concevoir les lois de commande avec des modèles simples développés dans l'environnement Matlab/Simulink, pour les différents types de couplage.

3.1.1. Cas rigide

Le modèle linéaire de la charge mécanique programmable présente un couplage rigide c'est-à-dire que le moteur d'entraînement et la charge mécanique programmable sont couplés rigidement comme nous le présente la figure 3.1. Le couplage rigide est le couplage le moins fréquent dans l'industrie, mais on peut dire que des charges flexibles deviennent des charges rigides si la constante de rigidité est très élevée.

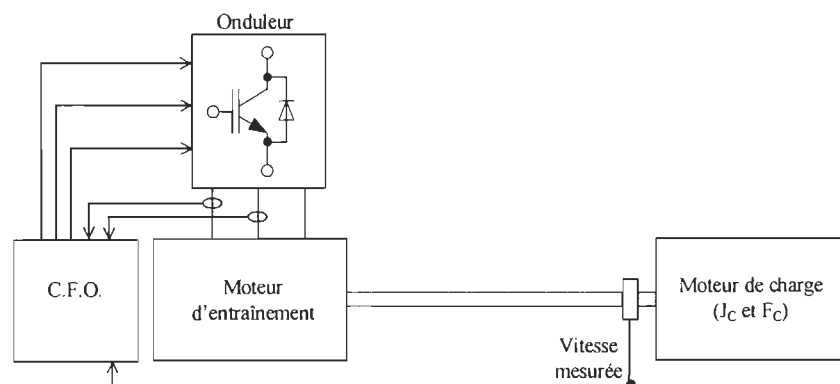


Fig.3.1 : Schéma bloc du système physique avec un couplage rigide

Les équations mécaniques d'un entraînement couplé rigidement à une charge sont données par :

$$J_M \ddot{\theta}_M + F_M \dot{\theta}_M = T_{cM} - T_c \quad (3.1)$$

$$J_c \ddot{\theta}_c + F_c \dot{\theta}_c = T_{cM} + T_c \quad (3.2)$$

Dans un couplage rigide, la position et la vitesse des arbres du moteur d'entraînement et de la charge sont égales. On a donc :

$$\theta_M = \theta_c = \theta ; \quad \dot{\theta}_M = \dot{\theta}_c = \dot{\theta} \quad \text{et} \quad \ddot{\theta}_M = \ddot{\theta}_c = \ddot{\theta} \quad (3.3)$$

La substitution de ces égalités dans les équations (3.1) et (3.2) permet de déduire l'équation de sortie du couple mécanique T_c tel que nous le montre l'équation (3.4).

$$(J_M - J_c) \ddot{\theta} + (F_M - F_c) \dot{\theta} = (T_{cM} - T_{cM}) - 2T_c \quad (3.4)$$

La détermination de l'accélération $\ddot{\theta}$ permettra de calculer l'équation de la sortie de couple mécanique T_c . Pour ce faire, nous utilisons un dérivateur combiné à un filtre du 1^{er} ordre pour reconstruire l'accélération à partir de la vitesse. Le filtre implanté se présente sous la forme suivante :

$$\dot{W} = -a_f W - a_f b_f \dot{\theta} \quad (3.5)$$

$$X = W + b_f \dot{\theta} \quad (3.6)$$

Où : a_f et b_f représentent les coefficients du filtre.

W est une variable interne et X représente l'accélération filtrée $\tilde{\ddot{\theta}}$.

Pour concevoir ce filtre, a_f et b_f sont déterminés de façon à avoir un filtre avec une bande passante plus grande que la bande passante du système afin de bien représenter le comportement du système, c'est-à-dire afin d'obtenir une bonne approximation de l'accélération. X est ensuite substituée dans l'équation (3.4) pour remplacer $\ddot{\theta}$. L'équation de sortie du couple filtré s'écrit comme suit :

$$\tilde{T}_C = \frac{1}{2} \{ (T_{eM} - T_{eC}) - (J_M - J_C) \ddot{X} - (F_M - F_C) \dot{\theta} \} \quad (3.7)$$

L'équation (3.7) nous permettra de calculer le couple mécanique T_C .

La vitesse est obtenue en intégrant l'équation suivante obtenue à l'aide des équations (3.1) et (3.2) et des hypothèses (3.3) :

$$T_{eC} + T_{eM} = J_T \ddot{\theta} + F_T \dot{\theta} \quad (3.8)$$

Tel que :

$$J_T = J_M + J_C \quad (3.9)$$

$$F_T = F_M + F_C \quad (3.10)$$

La figure 3.2 illustre le schéma bloc du système physique qui présente un couplage rigide sur Simulink (voir annexe A.1).

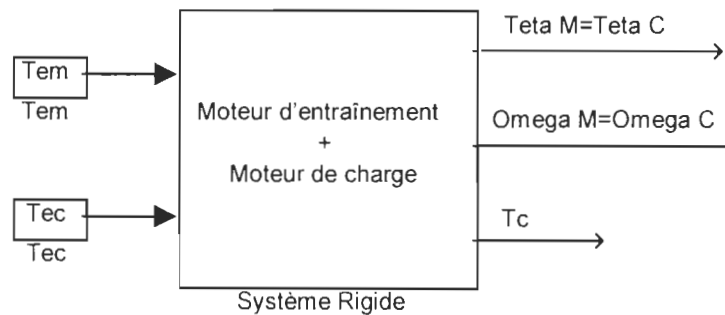


Fig.3.2 : Schéma bloc SIMULINK du système physique avec un couplage rigide

Un régulateur de vitesse est proposé pour le moteur d'entraînement, nous avons choisis un contrôleur de type PID.

Afin de faire la conception du régulateur, nous utilisons l'équation (3.8) qui donne le couple électromagnétique du moteur d'entraînement en fonction de l'inertie et du frottement du moteur

d'entraînement et de la charge. T_{cc} est posé à 0 et J_c et F_c sont remplacés par l'inertie et le frottement désirés de la charge J_{c1} et F_{c1} .

$$T_{em} = J_{T1} \ddot{\theta} + F_{T1} \dot{\theta} \quad (3.11)$$

Avec,

$$\begin{aligned} J_{T1} &= J_M + J_{c1} \\ F_{T1} &= F_M + F_{c1} \end{aligned} \quad (3.12)$$

La figure 3.3 présente le contrôleur PID. Il a comme entrées l'erreur entre la vitesse de consigne et la vitesse du moteur d'entraînement et comme sortie le couple électromagnétique du moteur d'entraînement (voir annexe A.1).

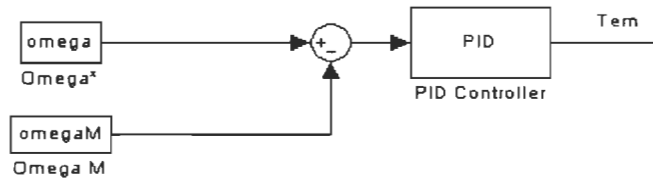


Fig.3.3 : Régulateur de vitesse PID

La figure 3.3, et l'équation (3.11) nous permettent d'écrire l'équation (3.13) :

$$(K_I + K_p s + K_d s^2)(\theta^* - \theta) = T_{em} = (J_{T1} s^2 + F_{T1} s) \theta \quad (3.13)$$

qui peut s'écrire:

$$\frac{\theta}{\theta^*} = \frac{K_I + K_p s + K_d s^2}{K_I + (K_p + F_{T1})s + (K_d + J_{T1})s^2} \quad (3.14)$$

Pour une bonne conception du PID on place un pré-filtre sur l'erreur pour éliminer les zéros du PID, exprimé par l'équation (3.15).

$$\frac{K_I}{K_I + K_P s + K_d s^2} \quad (3.15)$$

Donc l'équation (3.14) peut être écrite comme suit :

$$\frac{\theta}{\theta^*} = \frac{\frac{K_I}{(K_d + J_{T1})}}{s^2 + \frac{(K_P + F_{T1})}{(K_d + J_{T1})}s + \frac{K_I}{(K_d + J_{T1})}} \quad (3.16)$$

Les pôles de l'équation (3.16) sont les pulsations de coupure du système, on peut alors écrire:

$$(s + w1)(s + w2) = s^2 + s(w1 + w2) + w1w2 \quad (3.17)$$

où $w1$ et $w2$ sont les pulsations de coupure du système.

Nous obtenons:

$$s^2 + \frac{(K_P + F_{T1})}{(K_d + J_{T1})}s + \frac{K_I}{(K_d + J_{T1})} = s^2 + (w1 + w2)s + w1w2 \quad (3.18)$$

D'où,

$$\frac{(K_P + F_{T1})}{(K_d + J_{T1})} = (w1 + w2) \quad (3.19)$$

$$\frac{K_I}{(K_d + J_{T1})} = w1w2 \quad (3.20)$$

Nous observons que nous avons 2 équations et 3 inconnues. Le contrôleur peut donc être simplifié. D'après l'équation (3.11), on peut écrire que:

$$\frac{\dot{\theta}}{T_{em}} = \frac{1}{J_{T1}s + F_{T1}} \quad (3.21)$$

Selon l'équation (3.21) nous choisirons un contrôleur de type proportionnel intégral PI ($K_d = 0$)

au lieu d'un PID. Ceci nous permet de calculer le gain proportionnel et le gain intégral comme nous le montrent les équations (3.22) et (3.23).

$$K_p = (w1 + w2)J_{T1} - F_{T1} \quad (3.22)$$

$$K_I = w1w2J_{T1} \quad (3.23)$$

La figure 3.4 présente le schéma bloc du système physique qui présente un couplage rigide avec le régulateur de vitesse PI (voir annexe A.1).

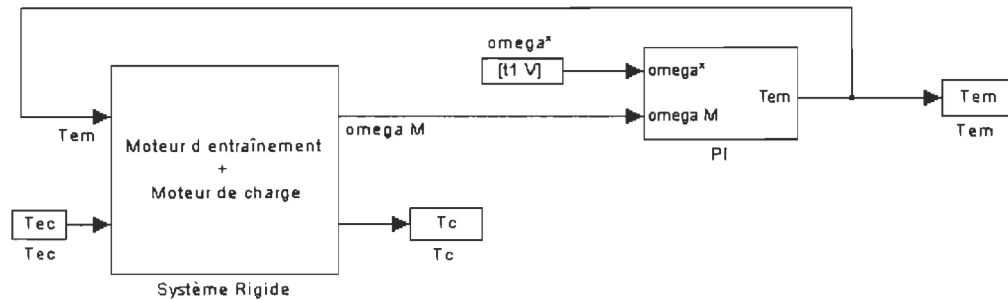


Fig.3.4 : Schéma général d'un système linéaire rigide avec le régulateur de vitesse

3.1.2. Cas flexible

Nous supposons l'existence d'un couplage flexible entre le moteur d'entraînement et la charge mécanique programmable. La plupart des charges industrielles sont des charges flexibles, ce qui nous permet d'étudier les machines dans des conditions plus réalistes comme nous le montre la figure 3.5.

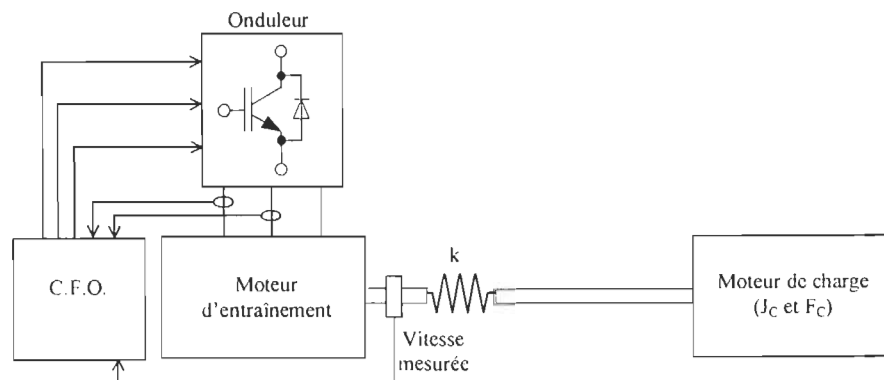


Fig.3.5 : Schéma bloc d'un système physique avec un couplage flexible

Les équations mécaniques d'un entraînement couplé de façon flexible à une charge sont données par :

- l'équation du moteur d'entraînement :

$$J_M \ddot{\theta}_M + F_M \dot{\theta}_M = T_{eM} - T_C \quad (3.24)$$

- l'équation de la charge :

$$J_C \ddot{\theta}_C + F_C \dot{\theta}_C = T_{eC} + T_C \quad (3.25)$$

- l'équation du couplage entre le moteur d'entraînement et la charge :

$$T_C = k(\theta_M - \theta_C) \quad (3.26)$$

A partir des équations (3.24), (3.25) et (3.26) on construit le modèle linéaire de la charge mécanique programmable et de sa charge dans le cas d'un couplage flexible, comme nous le montre la figure 3.6 (voir annexe A.2).

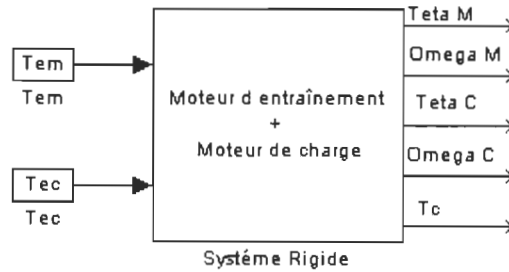


Fig.3.6 : Modèle du système physique avec un couplage flexible

Pour le régulateur de vitesse, on choisit le même contrôleur PI que celui conçu dans le cas rigide. La figure 3.7 illustre le schéma général du système linéaire qui présente un couplage flexible, avec régulateur de vitesse.

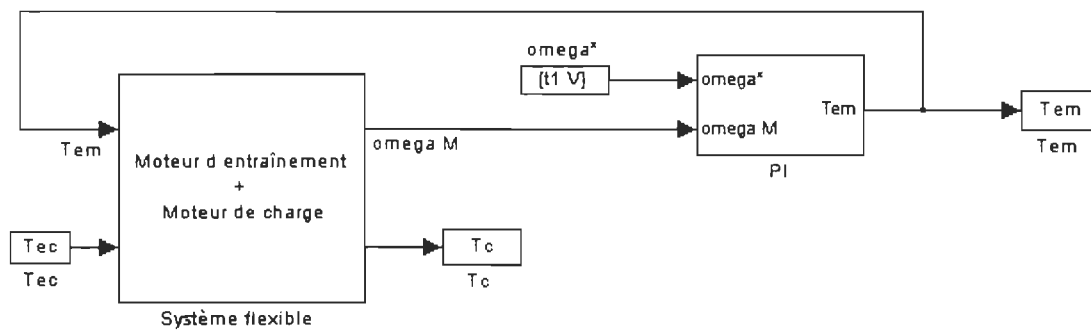


Fig.3.7 : Schéma général du système physique qui présente un couplage flexible avec régulateur de vitesse

Afin d'étudier des modèles plus complets, ou bien des modèles non linéaires, nous proposons dans le paragraphe qui suit les modèles non linéaires du moteur d'entraînement dans les cas de couplage rigide et flexible sous « Power System Blockset (PSB) » de Mathworks inc..

3.2. Modèles complets sous Power System Blockset (PSB)

Les modèles de PSB contiennent des modèles plus détaillés des convertisseurs qui s'approchent des modèles réels [6]. Ceci nous permettra de valider les lois de commande déjà développées pour les modèles linéaires avec des modèles plus réalistes.

Le PSB permet de modéliser et de simuler des systèmes électroniques de puissance dans l'environnement graphique Simulink. C'est une solution utile pour modéliser la génération, la transmission, la distribution et la conversion de l'énergie électrique, particulièrement en concevant les systèmes de commande associés. PSB est idéalement adapté au développement des systèmes d'alimentation complexes, comme ceux trouvés dans des automobiles, des avions, et des usines, et également des applications de l'électricité.

La bibliothèque de PSB contient les composants communs et les dispositifs qu'on retrouve dans les réseaux électriques. Les blocs sont basés sur des équations électriques et électromécaniques bien connues et emploient des symboles électriques standard, rendant facile la création des modèles graphiques intuitifs des systèmes électriques. Cette bibliothèque peut être combinée avec la bibliothèque de Simulink pour créer des schémas fonctionnels électriques se composant des éléments de PSB et des circuits de commande. L'intercommunication entre les blocs électriques et les blocs de Simulink nous permet d'étudier le système de commande.

Les machines asynchrones, sont utilisées pour étudier les systèmes d'entraînement (moteur sous-test+moteur charge) et sont contrôlées par une commande vectorielle. Ce schéma d'entraînement est illustré à la figure 3.8 (voir annexe B.2).

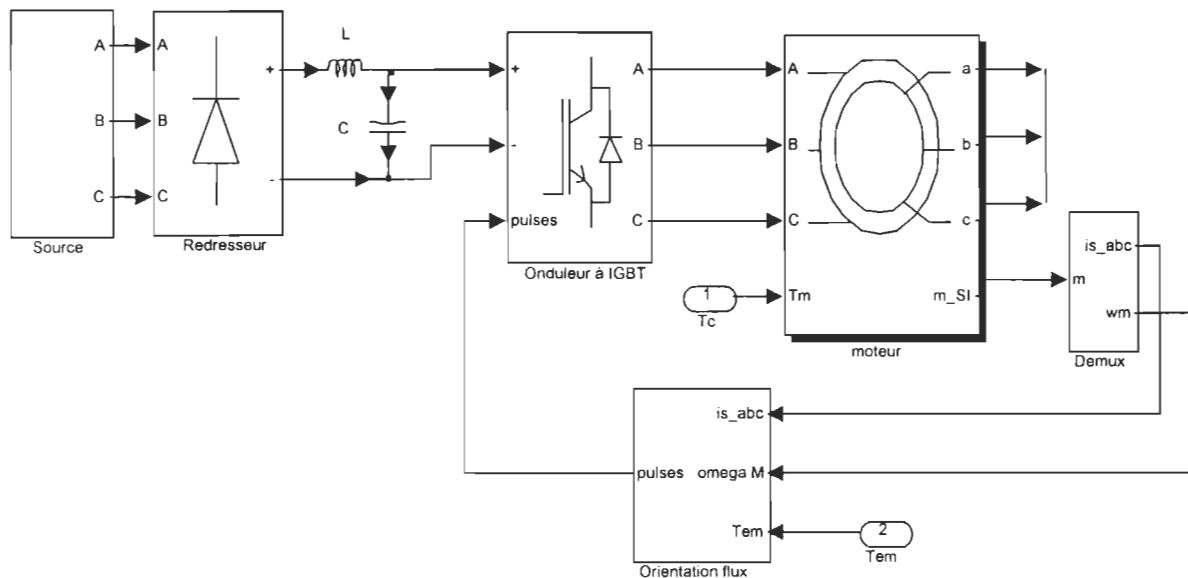


Fig.3.8 : Modèle PSB d'un entraînement CA à commande vectorielle

Le modèle de la charge se présente de la même façon que le moteur d'entraînement dans le cas d'un couplage flexible. PSB nous permet d'avoir les positions des deux machines, et en ajoutant la constante de rigidité du ressort (k), nous pouvons calculer le couple mécanique de la charge

dans le cas du couplage flexible comme nous le montre l'équation (3.26). Ceci est illustré à la figure 3.9 (voir annexe B.3).

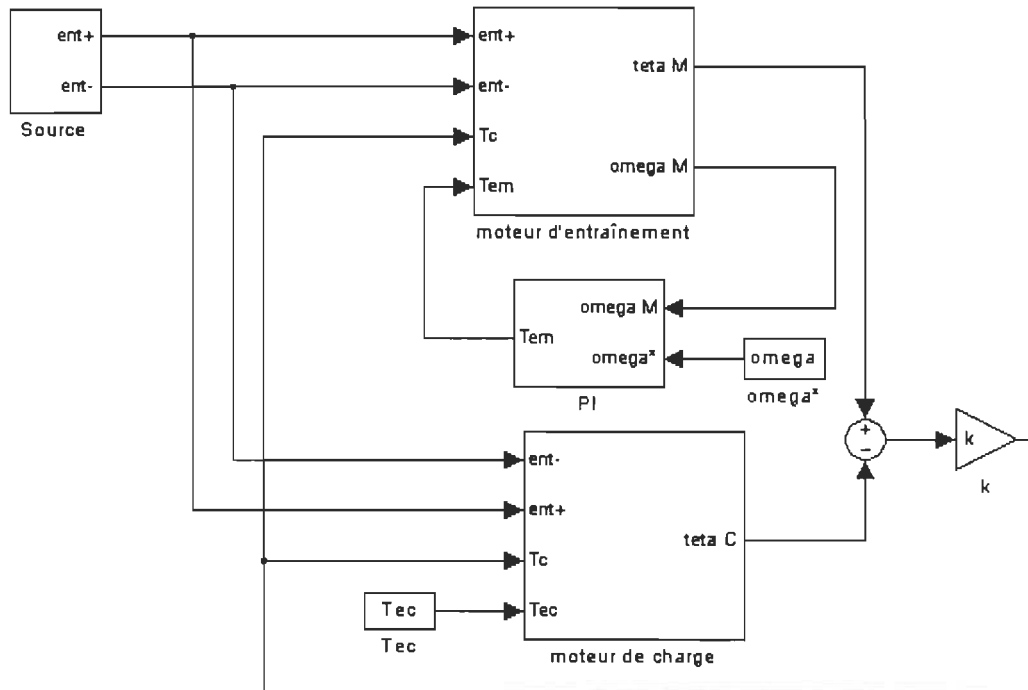


Fig.3.9 : Modèle PSB d'un système physique avec couplage flexible

La représentation par un ressort de rigidité infinie du couplage rigide d'un moteur d'entraînement avec un moteur de charge génère des problèmes d'instabilité numérique sur Simulink. Ces problèmes sont dus à la création de boucles algébriques. Nous devons donc développer un nouveau modèle pour simuler le couplage rigide sous PSB qui nous permet de contourner cette difficulté. Comme les modèles PSB de la machine asynchrone ne sont pas disponibles pour des modifications, nous avons dû utiliser les modèles de la librairie des moteurs de SIMUPELS [7] pour réaliser un nouveau modèle de deux machines asynchrones couplées rigidement. Le modèle consiste à transférer l'inertie et le frottement de la charge sur le modèle du moteur sous test. L'équation mécanique est donc omise sur le modèle du moteur de la charge, qui reçoit la variable vitesse à partir du modèle du moteur d'entraînement. Cette considération est valide vu

que les deux machines sont couplées rigidement et tournent donc exactement à la même vitesse. Les équations électriques du côté de la charge sont préservées dans le modèle et sont utilisées pour calculer le couple produit par la charge (T_C).

Le nouveau modèle utilise donc le modèle SIMUPELS de la machine asynchrone en association avec le modèle PSB. Pour le régulateur de vitesse, nous avons gardé le contrôleur PI développé pour les modèles linéaires. La figure 3.10 illustre le schéma d'un système physique avec couplage rigide sur PSB (voir annexe B.2).

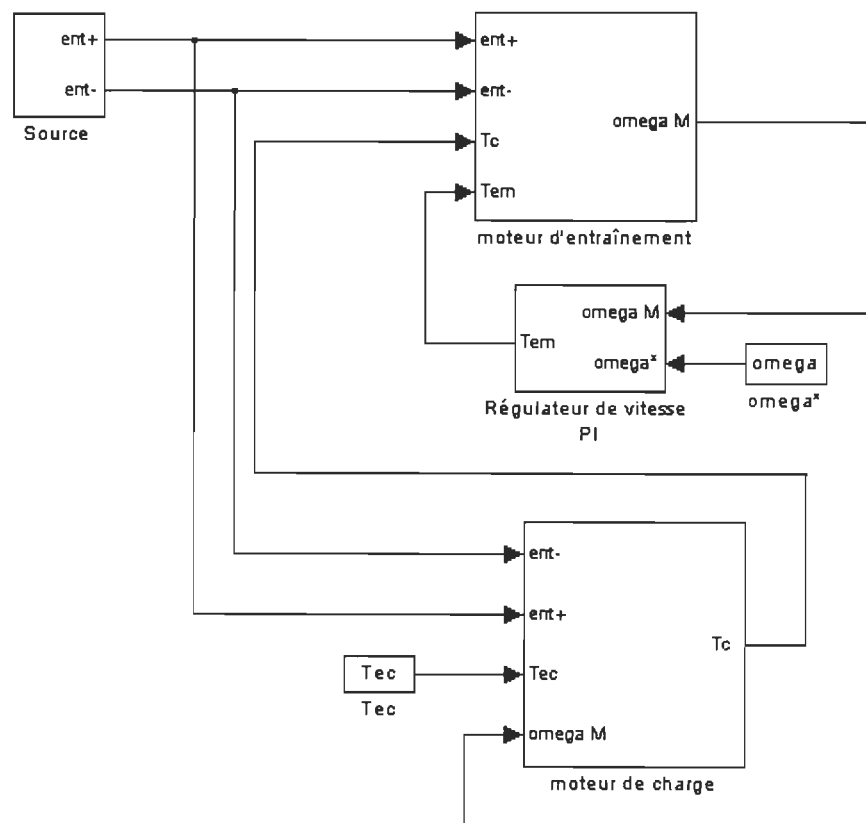


Fig.3.10 : Modèle PSB/SIMUPELS d'un système physique avec couplage rigide

Afin de tester les modèles linéaires et non linéaires, nous proposons dans le paragraphe qui suit quelques vérifications des modèles ainsi que du régulateur de vitesse.

3.3. Utilisation des modèles

Nous proposons pour le système physique du modèle linéaire, une vitesse de consigne telle que nous présente la figure 3.11. Afin de vérifier le régulateur de vitesse et aussi les équations du couplage du système physique, on simule le système avec les caractéristiques de machines réelles (voir annexe A.3).

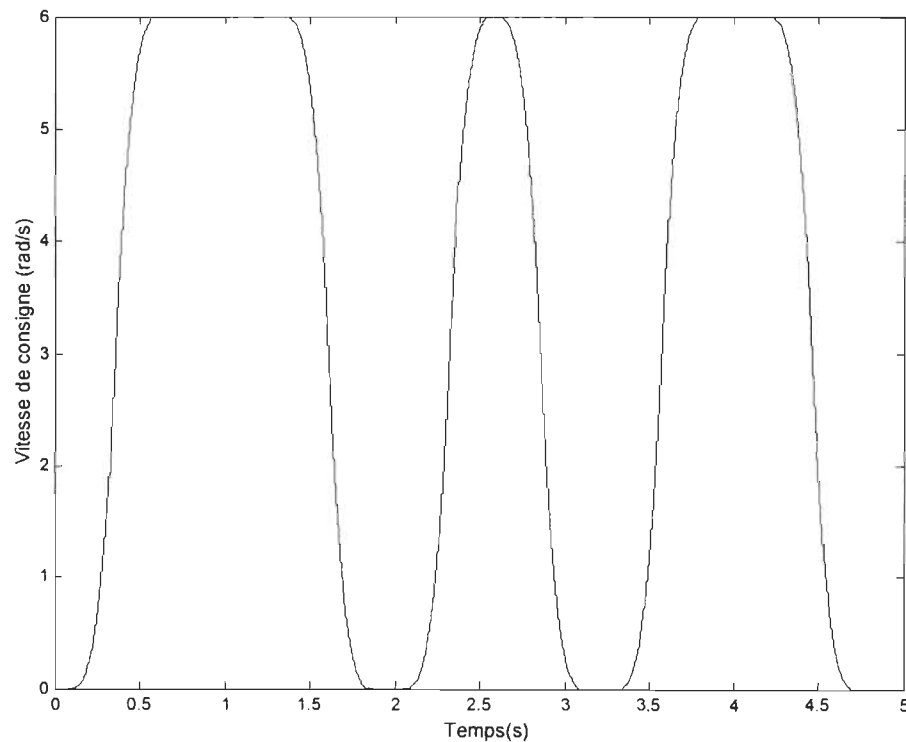


Fig.3.11 : Vitesse de consigne pour les modèles linéaires et non-linéaires

En simulant les modèles des figures 3.4 et 3.7, on s'attend à avoir une différence faible entre la vitesse de consigne et la vitesse du moteur d'entraînement. Les figures 3.12 et 3.13 montrent l'erreur de la vitesse du moteur d'entraînement et la vitesse de consigne pour le couplage rigide et flexible respectivement (voir annexe A.3).

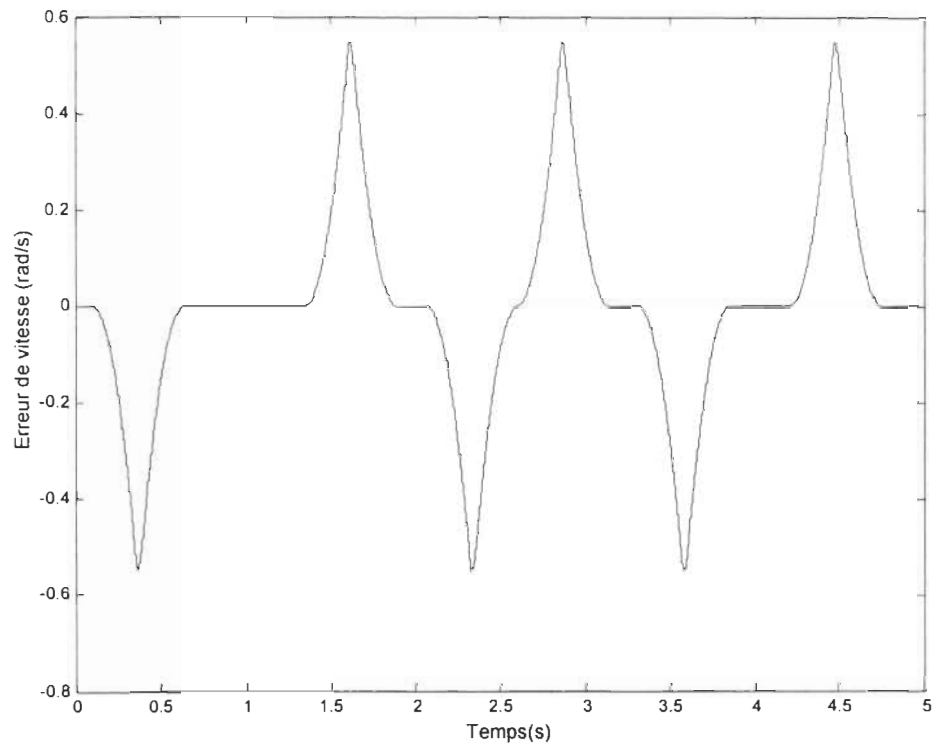


Fig.3.12 : Erreur de vitesse pour un couplage rigide : modèle linéaire

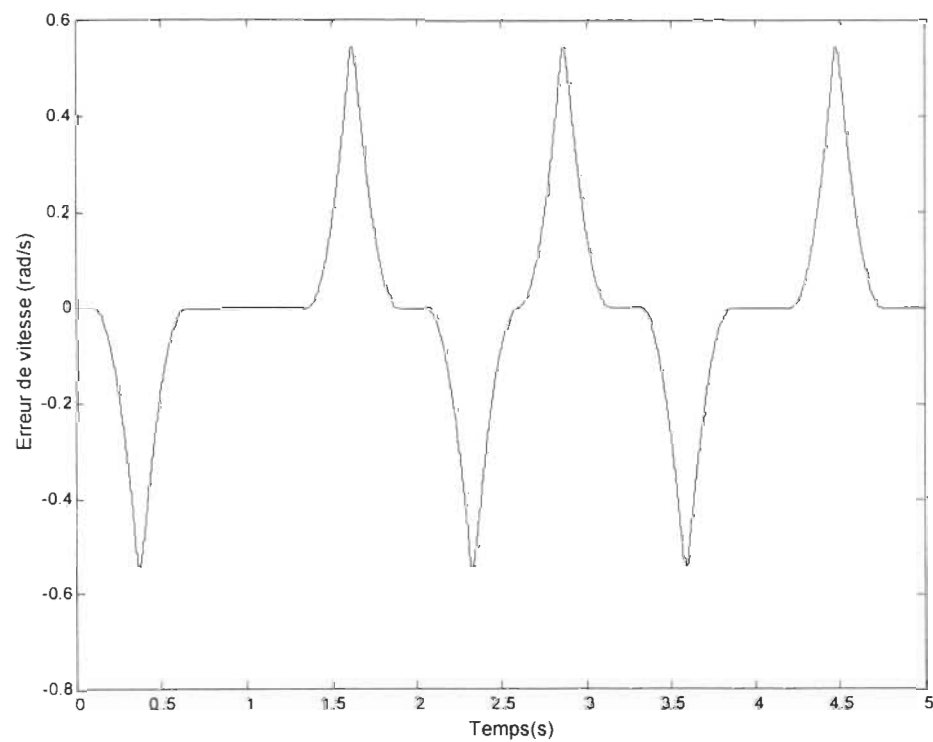


Fig.3.13 : Erreur de vitesse pour un couplage flexible : modèle linéaire

On remarque que les erreurs des deux vitesses sont très faibles et sont les plus importantes pendant les périodes d'accélération maximale. Ceci nous permet de dire que la vitesse du moteur d'entraînement suit bien la vitesse de consigne et que le régulateur de vitesse a été bien conçu.

Pour les modèles de PSB nous avons choisi la même consigne que celle utilisée pour les modèles linéaires, soit celle de la figure 3.11.

En simulant les modèles des figures 3.9 et 3.10, et en traçant l'erreur entre la vitesse de consigne et la vitesse du moteur d'entraînement nous obtenons les figures 3.14 et 3.15 pour le couplage rigide et flexible respectivement (voir annexe A.3).

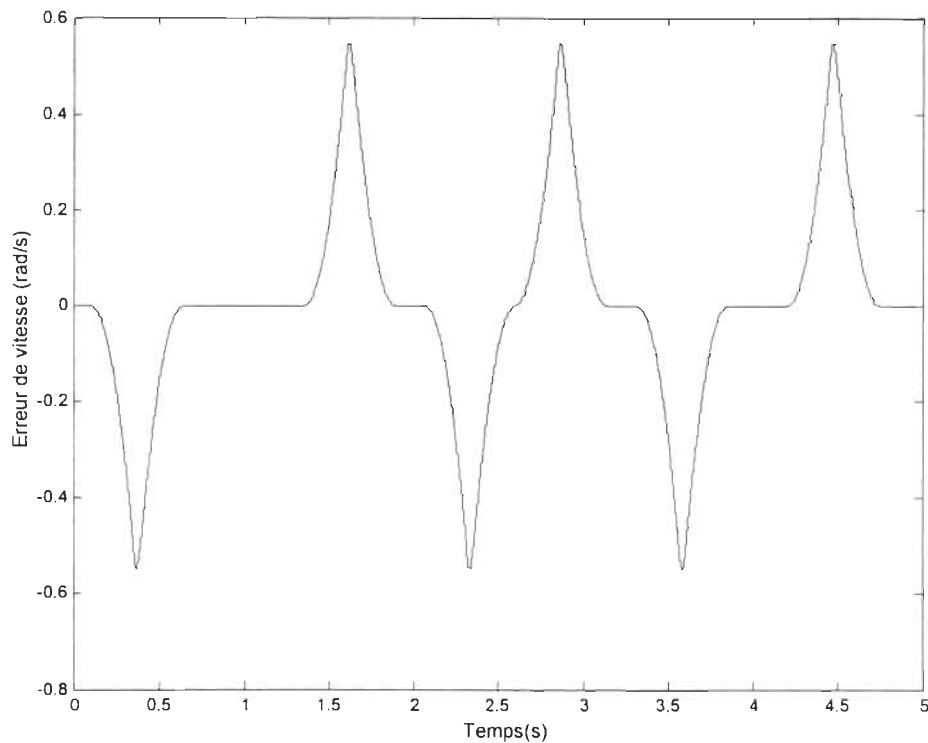


Fig.3.14 : Erreur de vitesse pour un couplage rigide : modèle PSB

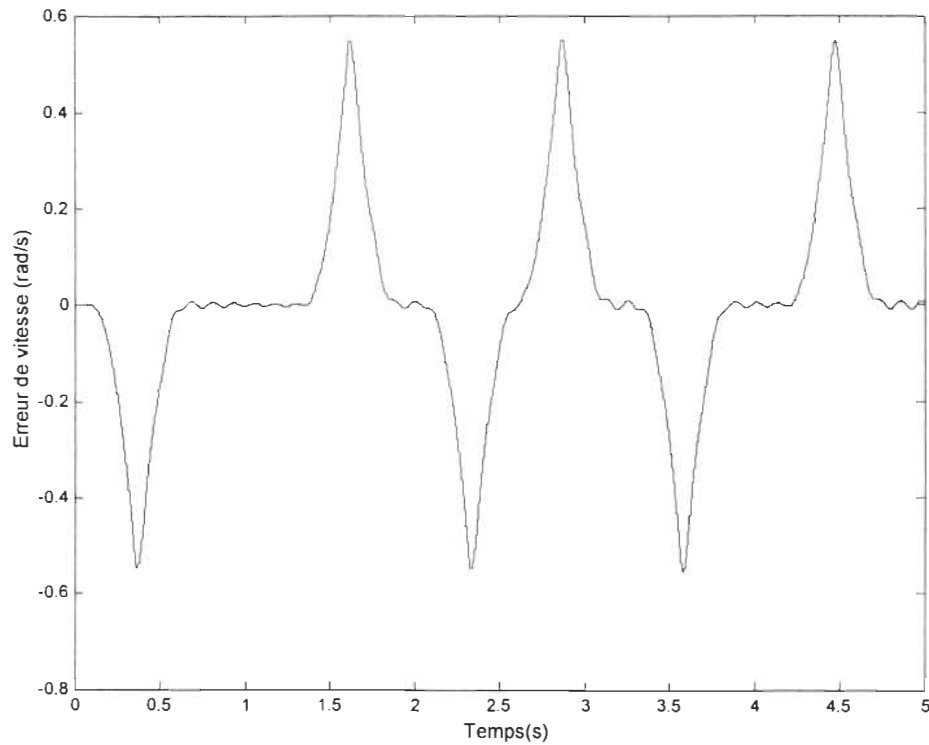


Fig.3.15 : Erreur de vitesse pour un couplage flexible : modèle de PSB

On constate que les erreurs des deux vitesses sont faibles. En comparaison avec le modèle linéaire, nous remarquons que l'erreur de la vitesse est presque pareille. Ceci nous permet donc de dire que la vitesse d'entraînement suit bien sa consigne. On déduit que le régulateur de vitesse est bien conçu pour les modèles linéaires et non-linéaires.

3.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude analytique générale de deux types de couplages (rigide et flexible) appliqués à deux modèles (linéaire et non linéaire). Ces modèles nous permettent de faire la conception de l'émulateur de charge pour les différents types de couplage. Dans le chapitre suivant nous allons présenter les détails de développement et les résultats de

simulation des lois de commande de la charge mécanique programmable des structures rigide-rigide, rigide-flexible, flexible-rigide et flexible-flexible dans les modèles linéaires.

CHAPITRE IV :

DÉVELOPPEMENT DES LOIS DE

COMMANDE DE LA CHARGE

MÉCANIQUE PROGRAMMABLE

L'émulateur d'une charge industrielle est généralement basé sur des hypothèses simplificatrices qui compromettent le modèle désiré de la charge mécanique programmable. Il s'agira donc de définir une loi de commande qui possédera les caractéristiques désirées, ainsi que des hautes performances dynamiques pour une structure générique du modèle de charges motrices.

Dans ce chapitre nous présentons l'émulateur de charge pour les quatre structures de couplage déjà définies RR, RF, FR et FF. Cependant les modèles linéaires sont utilisés pour valider les lois de commande de la charge mécanique programmable développées pour chaque structure.

4.1. Couplage rigide-rigide (RR)

Un système rigide-rigide (RR) consiste à imposer un couplage rigide avec les caractéristiques désirées au système physique qui présente lui aussi un couplage rigide.

Un système physique avec un couplage rigide peut être présenté comme suit :

$$T_{eM} = J_M \ddot{\theta}_M + F_M \dot{\theta}_M + T_C \quad (4.1)$$

$$T_{eC} = J_C \ddot{\theta}_C + F_C \dot{\theta}_C - T_C \quad (4.2)$$

Soit J_{Cl} et F_{Cl} l'inertie et le frottement du modèle de la charge désirée.

Le système physique qui présente un couplage rigide avec la charge désirée s'écrit comme suit :

$$T_{eM} = J_M \ddot{\theta}_M + F_M \dot{\theta}_M + T_C^* \quad (4.3)$$

$$0 = J_{Cl} \ddot{\theta}_C + F_{Cl} \dot{\theta}_C - T_C^* \quad (4.4)$$

La soustraction de l'équation (4.1) de l'équation (4.3) nous permet de déduire :

$$T_C = T_C^* \quad (4.5)$$

et d'après l'équation (4.4) on peut dire que le couple mécanique désiré s'écrit :

$$T_C^* = J_{Cl} \ddot{\theta} + F_{Cl} \dot{\theta} \quad (4.6)$$

Les équations (4.2) et (4.5) nous permettent d'écrire le couple électromagnétique de la charge désirée en boucle ouverte qui est présentée à la figure 2.10 et il est défini par:

$$T_{eCd} = J_C \ddot{\theta} + F_C \dot{\theta} - T_C^* \quad (4.7)$$

D'après la loi de commande en boucle fermée présentée à la figure 2.11, on peut dire que le couple électromagnétique de la charge désirée s'écrit de la façon suivante :

$$T_{eC}^* = T_{eCd} - \Delta T_{eC} \quad (4.8)$$

$$\text{où } \Delta T_{eC} = T_{C,mes} - T_C^*$$

Un contrôleur de type P à été choisi afin de corriger l'erreur du couple mécanique, d'où le couple électromagnétique de la charge désirée :

$$T_{ec}^* = T_{ecd} - T_{fh} \quad (4.9)$$

où :

$$T_{fh} = K_{pp} \Delta T_{ec} \quad (4.10)$$

Le couple mécanique mesuré $T_{c,mes}$ correspond à \tilde{T}_c obtenu par (3.7). Les couples électromagnétiques commandés (sortie des contrôleurs) sont employés dans (3.7) au lieu des couples estimés, tel qu'aucune grandeur électrique n'est requise pour l'émulateur. On utilise un filtre passe bas sur la vitesse $\dot{\theta}$ et sur l'accélération $\ddot{\theta}$ dans (4.7) de façon à avoir la même constante de temps dans le modèle global. Ce filtre est décrit par l'équation :

$$\frac{b_f}{s + a_f} \quad (4.11)$$

L'émulateur de la charge est illustré à la figure 4.1.

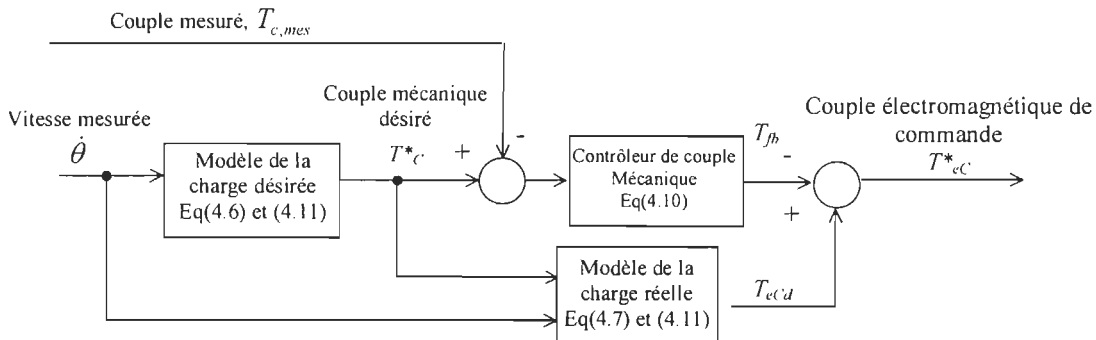


Fig.4.1 : Schéma bloc de l'émulateur de charge pour un couplage RR

L'émulateur de charge du système RR est simulé avec le modèle linéaire du système afin de vérifier la loi de commande. Le schéma général de la loi de commande d'un système RR dans SIMULINK est présenté à la figure 4.2 (voir annexe C.1).

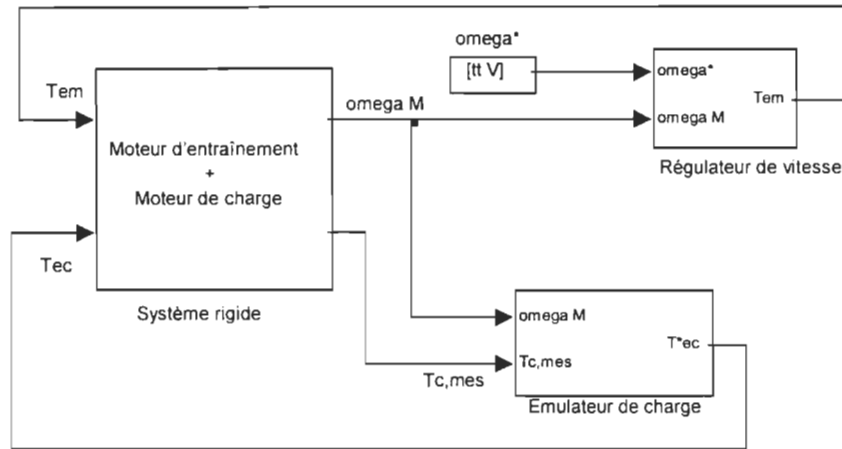


Fig.4.2 : Schéma général du système RR, modèle linéaire

Nous proposons un système physique présentant un couplage rigide, avec un régulateur de vitesse et sans émulateur de charge, tel que l'inertie et le frottement de la charge sont ceux de la charge désirée. Cette configuration est illustrée à la figure 4.3 (voir annexe C.1).

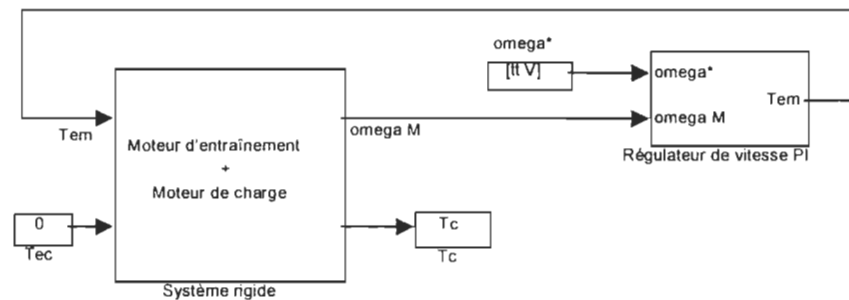


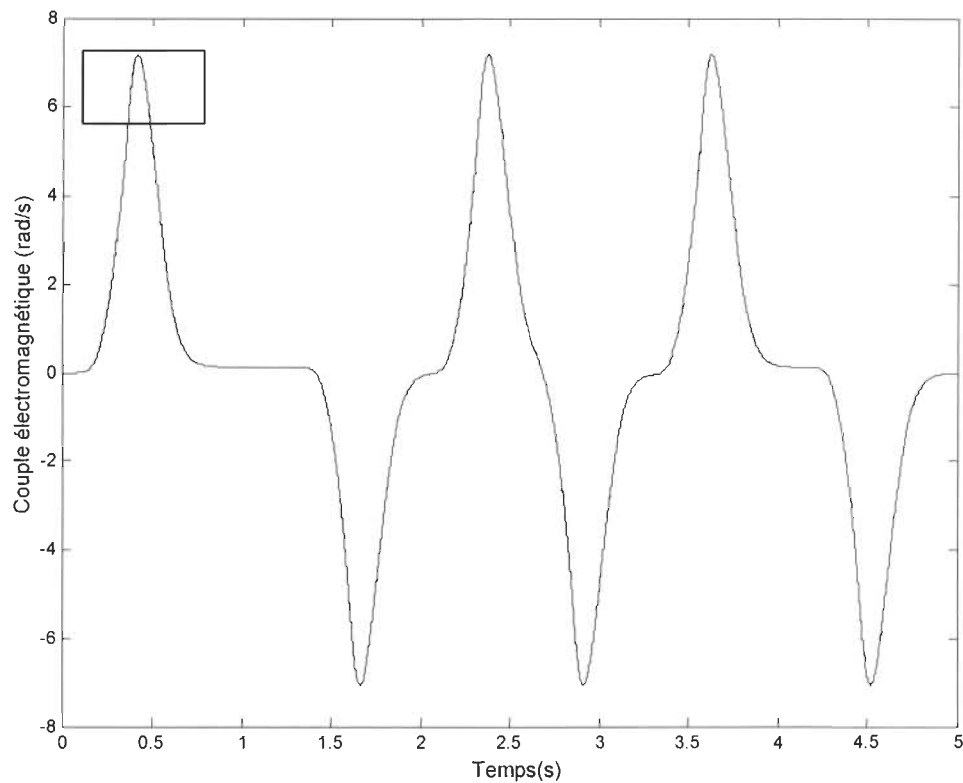
Fig.4.3 : Système physique avec couplage rigide sans émulateur avec régulation de vitesse, modèle linéaire

Ce modèle nous permet de valider la loi de commande du système RR, en comparant le couple électromagnétique du moteur d'entraînement du système physique avec la charge désirée au couple électromagnétique du moteur d'entraînement du système RR avec la loi d'émulation de charge. Le but est que ce dernier se comporte comme un système physique couplé rigidement avec les caractéristiques de la charge désirée. On s'attend à avoir une différence minime.

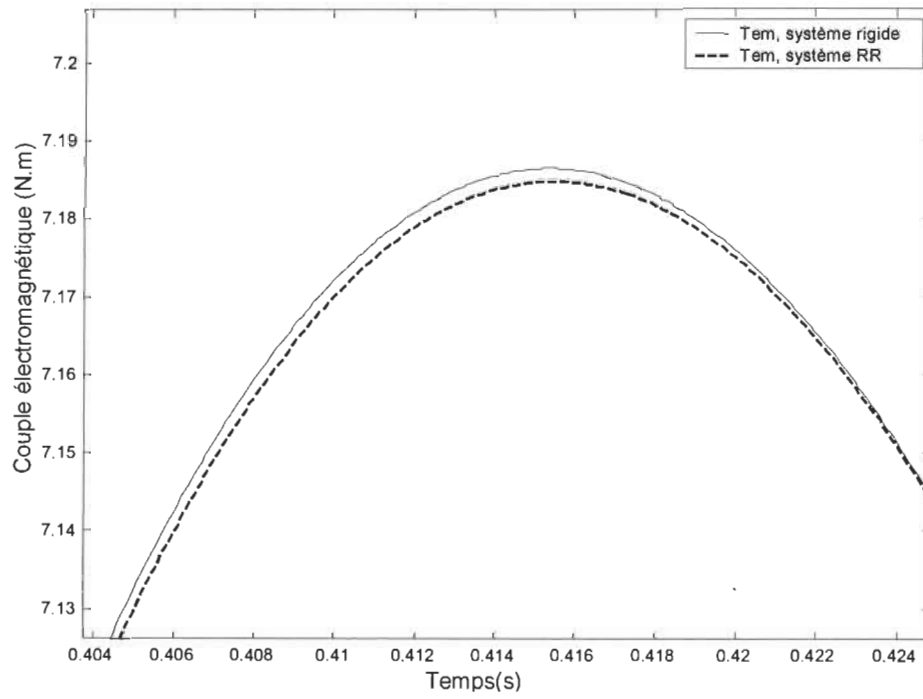
La figure 4.4 présente les deux couples électromagnétiques du moteur d'entraînement d'un système avec couplage rigide sans émulateur de charge (signal de référence – identifié par « système rigide ») et du système RR avec le modèle linéaire.

La figure 4.5 présente l'erreur du couple électromagnétique du moteur d'entraînement dans le modèle linéaire. La figure C.8 présente l'erreur de la vitesse du moteur d'entraînement entre le système RR et le système physique avec couplage rigide sans émulateur (voir annexe C.1).

On remarque que l'erreur du couple est très faible, ce qui nous amène à dire que le système RR suit bien le comportement imposé par l'émulateur de charge.



(a)



(b)

Fig.4.4 : Couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle linéaire (RR)

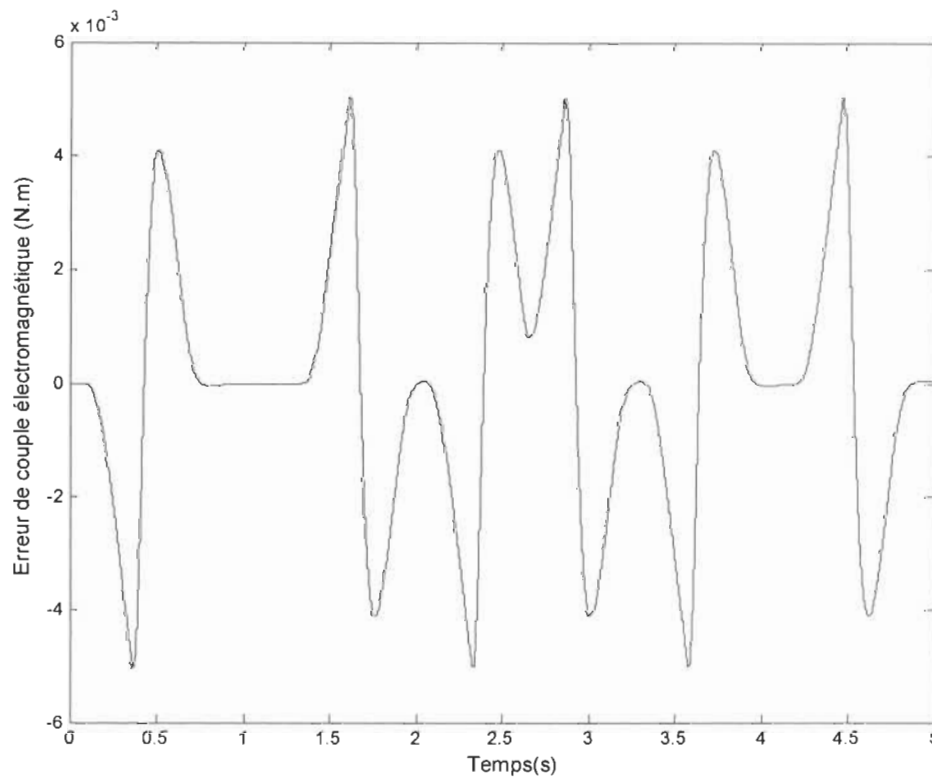


Fig.4.5 : Erreur de couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle linéaire (RR)

4.2. Couplage flexible-rigide (FR)

Un système de couplage flexible-rigide FR, permet d'imposer les caractéristiques désirées d'un système couplé rigidement à un système physique qui présente un couplage flexible.

Les équations mécaniques d'un système physique avec un couplage flexible, sont présentées comme suit :

$$T_{eM} = J_M \ddot{\theta}_M + F_M \dot{\theta}_M + T_C \quad (4.12)$$

$$T_{eC} = J_C \ddot{\theta}_C + F_C \dot{\theta}_C - T_C \quad (4.13)$$

$$T_C = k(\theta_M - \theta_C) \quad (4.14)$$

Le système physique avec couplage rigide de la charge désirée s'écrit comme suit :

$$T_{eM} = J_M \ddot{\theta}_M + F_M \dot{\theta}_M + T_C^* \quad (4.15)$$

$$0 = J_{C1} \ddot{\theta}_C + F_{C1} \dot{\theta}_C - T_C^* \quad (4.16)$$

la soustraction de l'équation (4.12) de (4.15) nous permet de calculer le couple mécanique désiré T_C^* , et en le remplaçant dans l'équation (4.16) on trouve, après avoir introduit le filtre sur l'accélération du moteur:

$$T_C^* = T_C = k(\theta_M - \theta_C) = J_{C1} \ddot{\theta}_M + F_{C1} \dot{\theta}_M \quad (4.17)$$

La substitution de l'équation (4.17) dans (4.13) permet de trouver le couple électromagnétique de la charge désirée T_{eCd} en boucle ouverte:

$$T_{eCd} = J_C \ddot{\theta}_C + F_C \dot{\theta}_C - J_{C1} \ddot{\theta}_M - F_{C1} \dot{\theta}_M \quad (4.18)$$

Pour implanter la commande en boucle fermée telle qu'illustrée à la figure 2.11, le couple électromagnétique de la charge désirée s'écrit de la même façon que l'équation (4.8).

Un contrôleur de type PD est utilisé pour minimiser l'erreur du couple mécanique T_C . Le couple électromagnétique de la charge désirée peut s'écrire comme suit :

$$T'_{ec} = J_C \ddot{\tilde{\theta}}_C + F_C \dot{\tilde{\theta}}_C - J_{C1} \ddot{\tilde{\theta}}_M - F_{C1} \dot{\tilde{\theta}}_M - [K_{pp} \Delta Tec + K_d \frac{d\Delta Tec}{dt}] \quad (4.19)$$

Où :

$$K_{pp} \Delta Tec = K_{pp} (T_{C,mes} - J_{C1} \ddot{\tilde{\theta}}_M - F_{C1} \dot{\tilde{\theta}}_M) \quad (4.20)$$

$$\begin{aligned} K_d \frac{d\Delta Tec}{dt} &= K_d \left(\frac{d}{dt} (T_{C,mes} - J_{C1} \ddot{\tilde{\theta}}_M - F_{C1} \dot{\tilde{\theta}}_M) \right) \\ &\cong -K_d \dot{T}_C = -K_d k (\dot{\theta}_M - \dot{\theta}_C) \end{aligned} \quad (4.21)$$

Nous avons posé l'hypothèse ici que l'accélération et la dérivée d'accélération du moteur d'entraînement sont faibles. Cette hypothèse est valable si la consigne de vitesse est continue et dérivable au moins deux fois avec ses dérivées première et seconde suffisamment faibles et que la loi de commande est stable. La consigne de vitesse satisfait les hypothèses de continuité et de dérivabilité. Afin d'avoir la même constante de temps dans le modèle global, nous ajoutons un filtre passe bas sur les vitesses $\dot{\theta}_M$ et $\dot{\theta}_C$. Ce filtre est décrit par l'équation (4.11).

L'émulateur de charge pour le système FR est illustré à la figure 4.6 (voir annexe D.1).

Nous simulons le modèle linéaire, afin de valider la loi de commande du système FR. Le schéma général de l'émulateur de charge et le système flexible dans Simulink présenté à la figure 4.7 (voir annexe D.1).

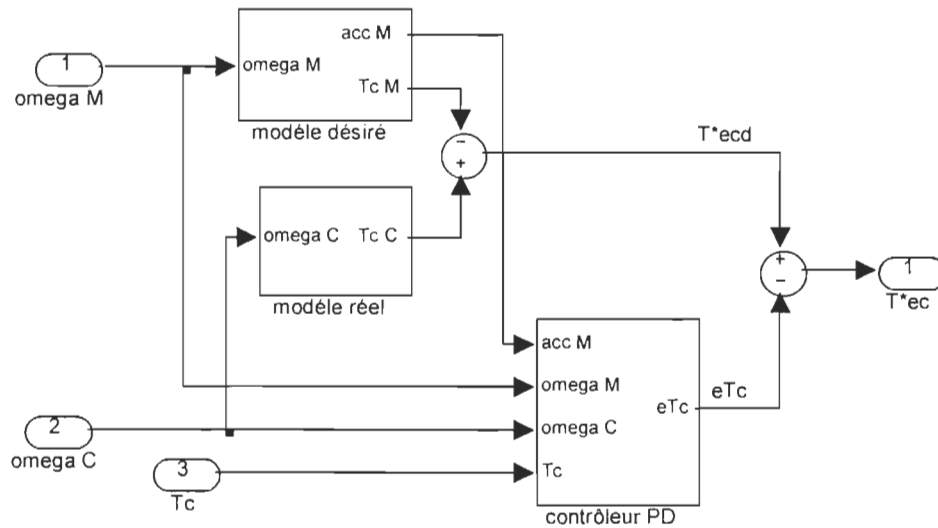


Fig.4.6 : Schéma de l'émulateur de charge pour un couplage FR

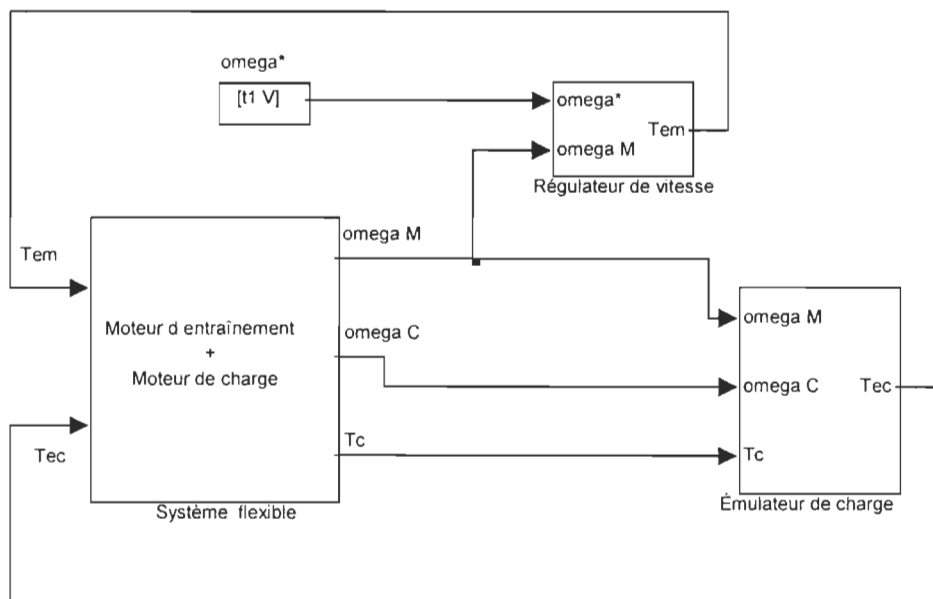


Fig.4.7 : Schéma général du système FR, modèle linéaire

Le modèle du système physique avec couplage rigide et les caractéristiques désirées de la charge présenté dans la figure 4.3 nous permet aussi dans ce cas de valider le modèle FR.

La figure 4.8 présente les deux couples électromagnétiques du moteur d'entraînement d'un système avec couplage rigide sans émulateur de charge et du système FR avec le modèle linéaire.

La figure 4.9 montre l'erreur entre le système avec couplage rigide sans émulateur et le système FR du couple électromagnétique du moteur d'entraînement avec les modèles linéaires.

La figure D.6 présente l'erreur de vitesse du moteur d'entraînement entre le système FR et le système physique sans émulateur (voir annexe D.1).

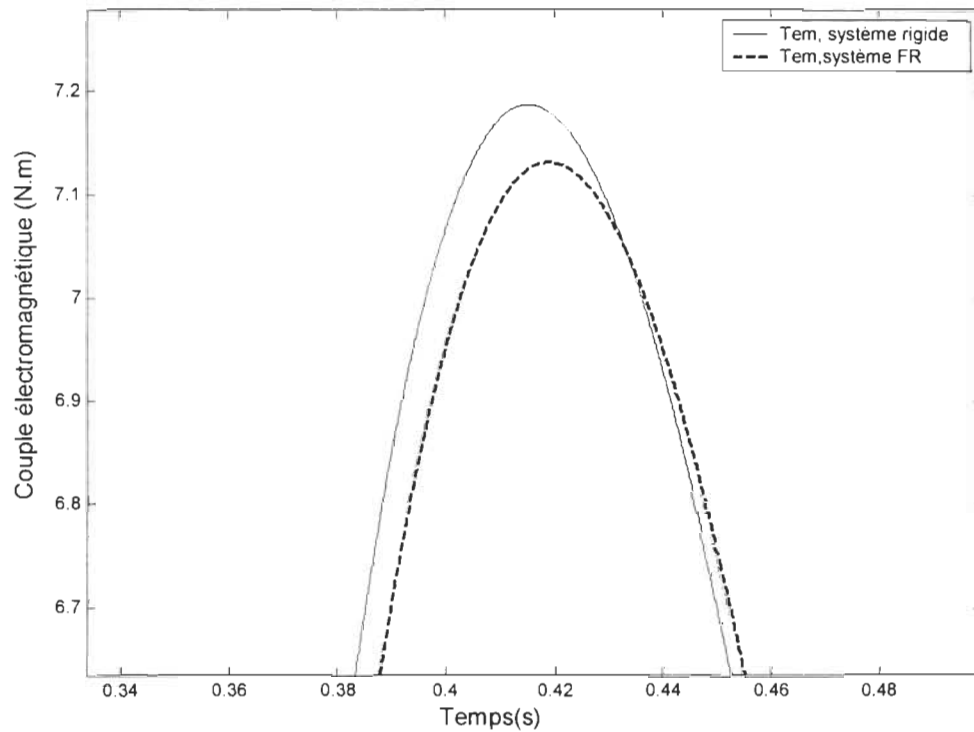


Fig.4.8 : Couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle linéaire (FR)

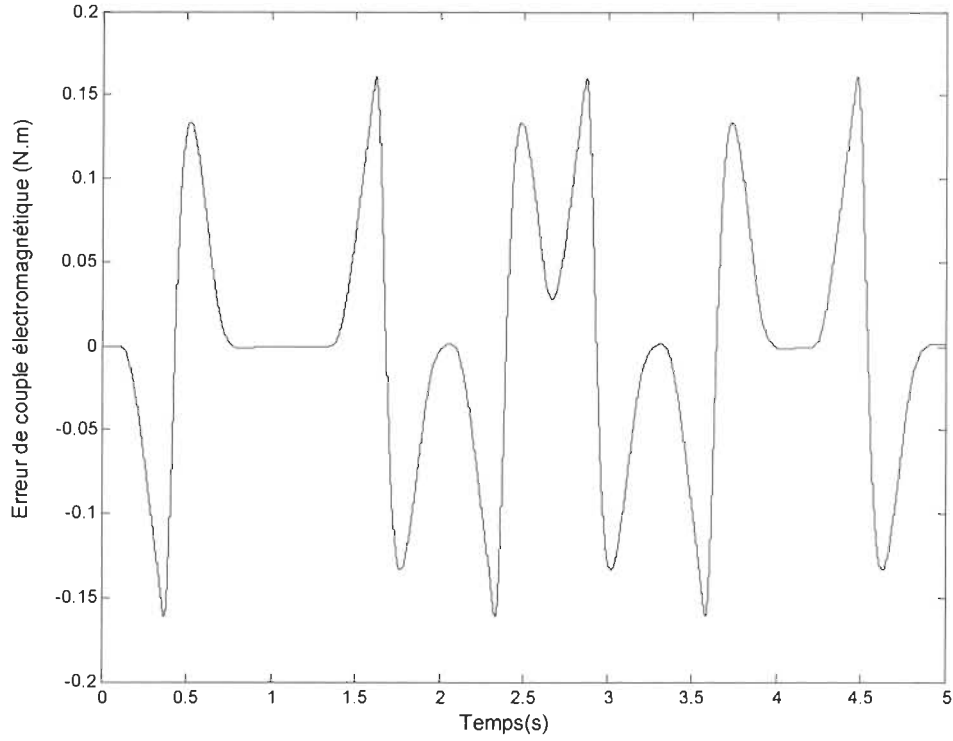


Fig.4.9 : Erreur de couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle linéaire (FR)

On remarque que l'erreur du couple est faible, ce qui nous permet d'affirmer que le système physique flexible suit le comportement d'un système physique rigide avec les caractéristiques de la charge désirée imposées par l'émulateur.

4.3. Couplage rigide-flexible (RF)

Un système de couplage rigide flexible RF, consiste à imposer les caractéristiques de la charge désirée avec couplage flexible à un système physique qui présente un couplage rigide.

Un système rigide est représenté par les équations (4.1) et (4.2), ce qui nous permet d'écrire l'équation du couple comme suit :

$$T_{cM} + T_{cC} = (J_M + J_C)\ddot{\theta}_M + (F_M + F_C)\dot{\theta}_M = J_T\ddot{\theta}_M + F_T\dot{\theta}_M \quad (4.22)$$

Le système flexible désiré est défini par :

$$T_{eM} = J_M \ddot{\theta}_M + F_M \dot{\theta}_M + k(\theta_M - \theta_{C1}) \quad (4.23)$$

$$0 = J_{C1} \ddot{\theta}_{C1} + F_{C1} \dot{\theta}_{C1} - k(\theta_M - \theta_{C1}) \quad (4.24)$$

Tel que le couple mécanique désiré est:

$$T_{C^*} = k(\theta_M - \theta_{C1}) \quad (4.25)$$

En remplaçant le couple mécanique désiré de l'équation (4.25) dans l'équation du couple électromagnétique du moteur d'entraînement (4.23), et en soustrayant l'équation (4.22) de l'équation (4.23) nous pourrions calculer le couple électromagnétique de la charge désirée en boucle ouverte comme suit, après avoir introduit le filtre sur l'accélération du moteur :

$$T_{eCd} = J_C \ddot{\theta}_M + F_C \dot{\theta}_M - T_{C^*} \quad (4.26)$$

On sait que dans le système physique les positions, les vitesses et les accélérations sont égales puisque nous avons un couplage rigide. Pour le calcul du couple mécanique désiré T_{C^*} , tel que présenté par l'équation (4.25), nous avons besoin de la position de la charge désirée. Or dans le système physique nous avons accès uniquement à la position du moteur d'entraînement. D'après l'équation (4.24) on peut écrire la position, la vitesse et l'accélération de la charge désirée en fonction de la position du moteur d'entraînement de la façon suivante :

$$\theta_M = \frac{J_{C1}}{k} \ddot{\theta}_{C1} + \frac{F_{C1}}{k} \dot{\theta}_{C1} + \theta_{C1} \quad (4.27)$$

L'équation (4.27) peut s'écrire sous la forme d'une équation d'état avec la position du moteur d'entraînement θ_M comme entrée, la position, la vitesse de la charge désirée $(\theta_{C1}, \dot{\theta}_{C1})$ comme des variables d'état et la position de charge désirée θ_{C1} comme variable de sortie (voir annexe E.1).

Le couple électromagnétique de la charge désirée T_{eC^*} en boucle fermée s'écrit de la même façon que les équations (4.8).

Un contrôleur de type P est utilisé afin de minimiser l'erreur du couple mécanique $\Delta e T_c$, le couple électromagnétique de la charge désirée se définit par :

$$T_{ec}^* = J_c \cdot \ddot{\theta}_M + F_c \cdot \dot{\theta}_M - T_c^* - K_{pp} \Delta T_{ec} \quad (4.28)$$

Nous ajoutons un filtre passe-bas qui est déjà présenté par l'équation (4.11) sur la vitesse d'entraînement $\dot{\theta}_M$ et la vitesse de la charge désirée $\dot{\theta}_{c1}$.

L'émulateur de charge du système RF est présenté comme suit (voir annexe E.1).

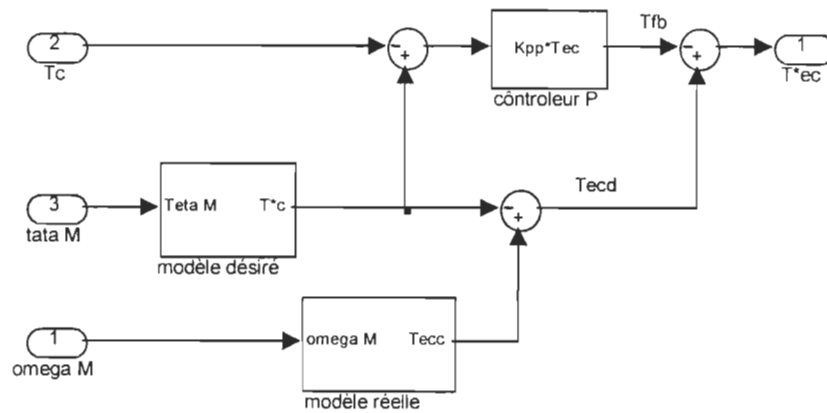


Fig.4.10 : Schéma de l'émulateur de charge pour le couplage RF

Le système global de l'émulateur de charge et le système rigide dans SIMULINK avec modèle linéaire sont illustrés à la figure 4.11.

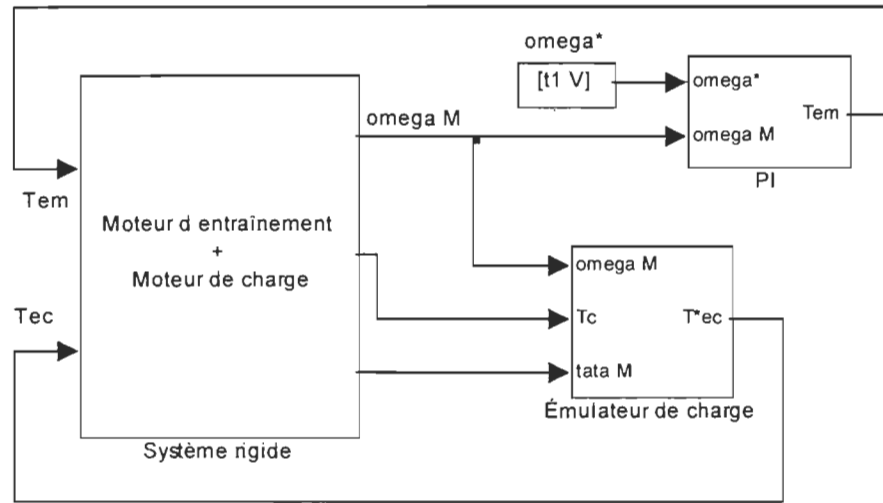


Fig.4.11 : Schéma général du système RF, modèle linéaire

Nous proposons un système physique qui présente un couplage flexible, avec régulateur de vitesse et sans émulateur de charge, tel que l'inertie et le frottement de la charge sont ceux de la charge désirée. Cette configuration est illustrée à la figure 4.12 (voir annexe E.1).

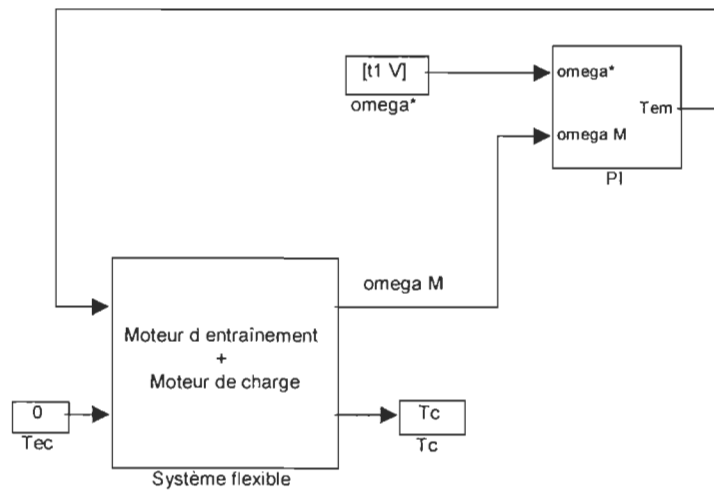


Fig.4.12 : Système physique avec couplage flexible sans émulateur, modèle linéaire

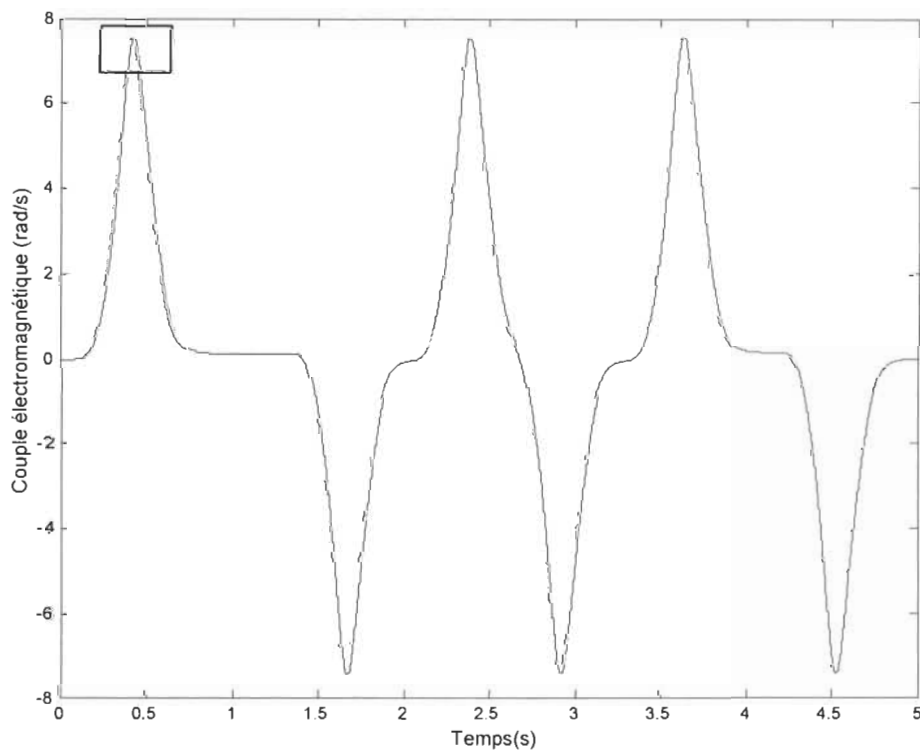
Ce modèle nous permet de valider la loi de commande du système RF en comparant le couple électromagnétique du moteur d'entraînement du système physique RF avec le couple

électromagnétique du moteur d'entraînement du système physique avec couplage flexible sans émulateur.

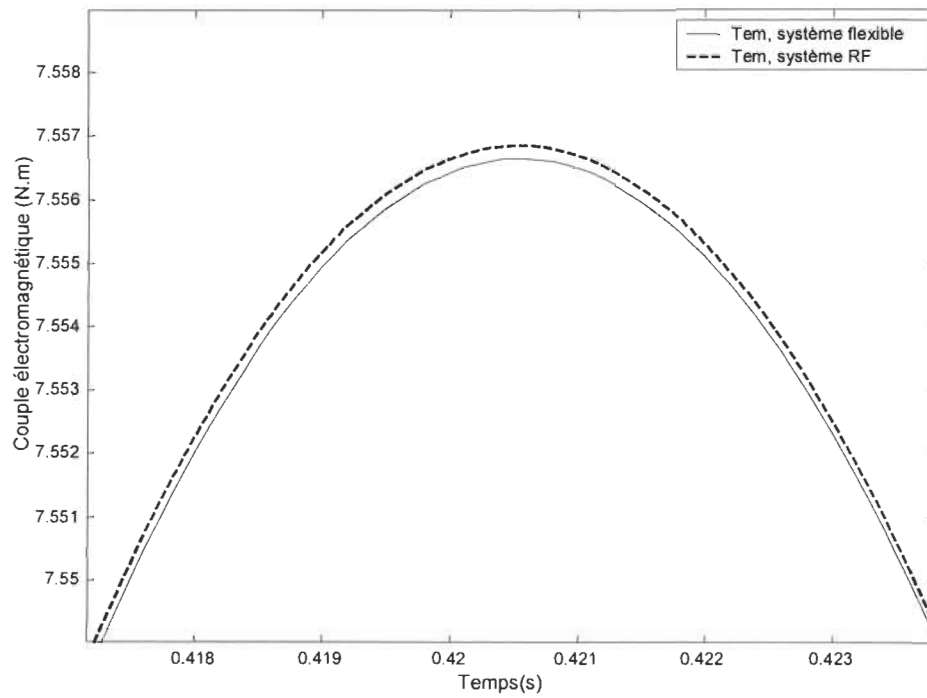
La figure 4.13 présente les deux couples électromagnétiques du moteur d'entraînement d'un système avec couplage flexible sans émulateur de charge et du système RF dans le modèle linéaire.

La figure 4.14 présente l'erreur du couple électromagnétique du moteur d'entraînement entre le système physique avec couplage flexible sans émulateur et le système physique avec couplage rigide avec émulateur.

La figure E.5 présente l'erreur de vitesse du moteur d'entraînement entre le système RF et le système physique sans émulateur (voir annexe E.1).



(a)



(b)

Fig 4.13 : Couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle linéaire (RF)

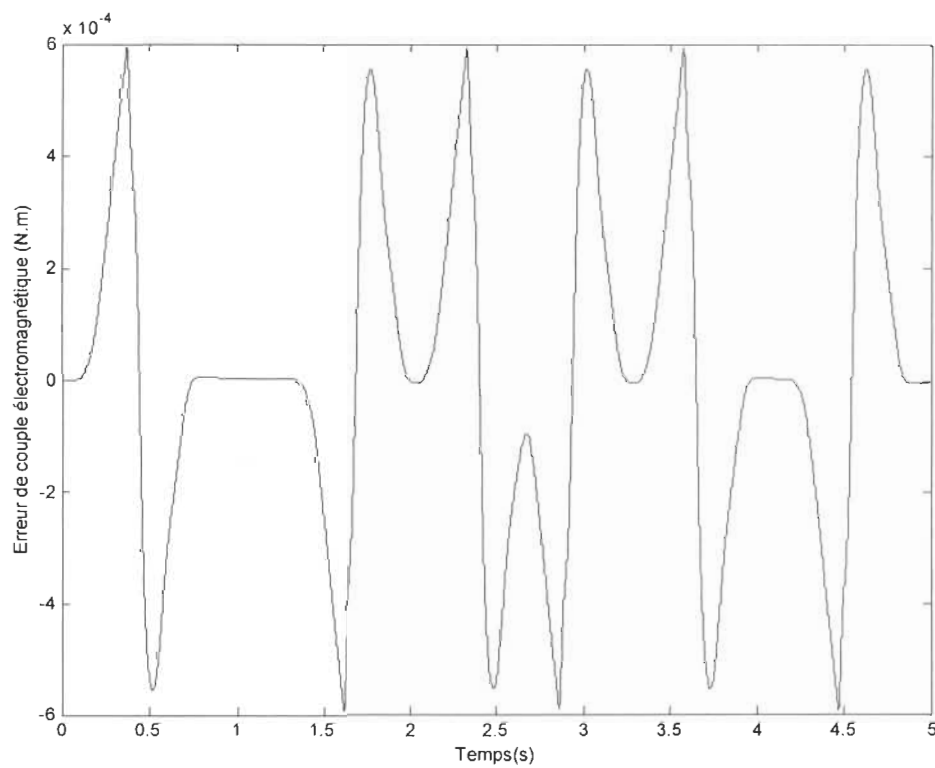


Fig.4.14 : Erreur de couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle linéaire (RF)

La figure 4.14 montre que l'erreur du couple T_{eM} est faible ce qui nous permet de dire que le système RF se comporte comme un système physique avec un couplage flexible et caractéristique de la charge désirée.

4.4. Couplage flexible-flexible (FF)

Un système avec couplage flexible-flexible (FF), consiste à imposer les caractéristiques désirées d'un système avec couplage flexible à un système physique qui présente un couplage flexible avec une constante de flexibilité différente.

Un système flexible est défini par les équations (4.12), (4.13) et (4.14).

Le modèle désiré d'un système flexible s'écrit comme suit :

$$T_{eM} = J_M \ddot{\theta}_M + F_M \dot{\theta}_M + k_1(\theta_M - \theta_{C1}) \quad (4.29)$$

$$0 = J_{C1} \ddot{\theta}_{C1} + F_{C1} \dot{\theta}_{C1} - k_1(\theta_M - \theta_{C1}) \quad (4.30)$$

Le couple mécanique désiré s'écrit comme suit :

$$T_{C1}^* = k_1(\theta_M - \theta_{C1}) \quad (4.31)$$

La soustraction de l'équation (4.12) de (4.29) nous donne :

$$k(\theta_M - \theta_{C1}) = k_1(\theta_M - \theta_{C1}) \quad (4.32)$$

d'après les équations (4.32) et (4.30) on peut écrire:

$$k(\theta_M - \theta_{C1}) = J_{C1} \ddot{\theta}_{C1} + F_{C1} \dot{\theta}_{C1} \quad (4.33)$$

En remplaçant l'équation (4.33) dans l'équation (4.13), nous déduisons le couple électromagnétique de la charge désirée en boucle ouverte qui s'écrit comme suit, après avoir introduit le filtre sur l'accélération de la charge :

$$T_{eM} = J_C \ddot{\tilde{\theta}}_C + F_C \dot{\tilde{\theta}}_C - J_{C1} \ddot{\theta}_{C1} - F_{C1} \dot{\theta}_{C1} \quad (4.34)$$

ou bien

$$T_{ecd} = J_c \ddot{\theta}_c + F_c \dot{\theta}_c - T_c^* \quad (4.35)$$

Il reste à calculer la position de la charge désirée θ_{c1} , à partir de l'équation (4.30), en fonction de la position du moteur d'entraînement θ_M

$$\theta_M = \frac{J_{c1}}{k_1} \ddot{\theta}_{c1} + \frac{F_{c1}}{k_1} \dot{\theta}_{c1} + \theta_{c1} \quad (4.36)$$

L'équation (4.36) peut s'écrire sous la forme d'une équation d'état avec la position du moteur d'entraînement θ_M comme entrée, la position et la vitesse de la charge désirée $(\theta_{c1}, \dot{\theta}_{c1})$ comme des variables d'état et la position de la charge désirée θ_{c1} comme sortie (voir annexe F.1).

Le couple électromagnétique désiré T_{ec}^* en boucle fermée est représenté par les équations (4.8).

On ajoute un contrôleur de type PD afin de minimiser l'erreur du couple mécanique ΔT_{ec} .

Le couple électromagnétique de la charge désirée s'écrit comme suit :

$$T_{ec}^* = J_c \ddot{\theta}_M + F_c \dot{\theta}_M - J_{c1} \ddot{\theta}_{c1} - F_{c1} \dot{\theta}_{c1} - [K_{pp} \Delta T_{ec} + K_d \frac{d\Delta T_{ec}}{dt}] \quad (4.37)$$

Tel que :

$$K_{pp} \Delta T_{ec} = K_{pp} (T_{c,mes} - T_c^*) \quad (4.38)$$

$$K_d \frac{d\Delta T_{ec}}{dt} = K_d \frac{d}{dt} (T_{c,mes} - T_c^*) \quad (4.39)$$

Le calcul du terme $\frac{d}{dt} (T_{c,mes} - T_c^*)$ se fait à partir du filtre dérivatif défini dans les équations (3.5) et (3.6). On ajoute un filtre passe-bas sur la vitesse du moteur d'entraînement $\dot{\theta}_M$ et la vitesse de la charge $\dot{\theta}_c$.

L'émulateur de charge du système FF est illustré à la figure 4.15 (voir annexe F.1)

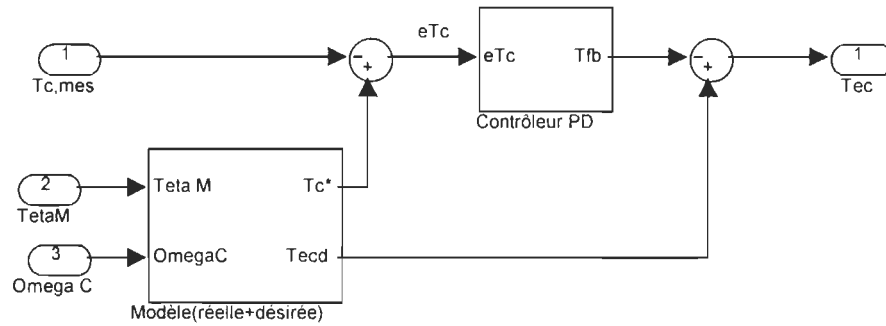


Fig.4.15 : Schéma de l'émulateur de charge pour le couplage FF

Le schéma général de l'émulateur de charge et le système flexible dans SIMULINK avec le modèle linéaire sont présentés à la figure 4.16

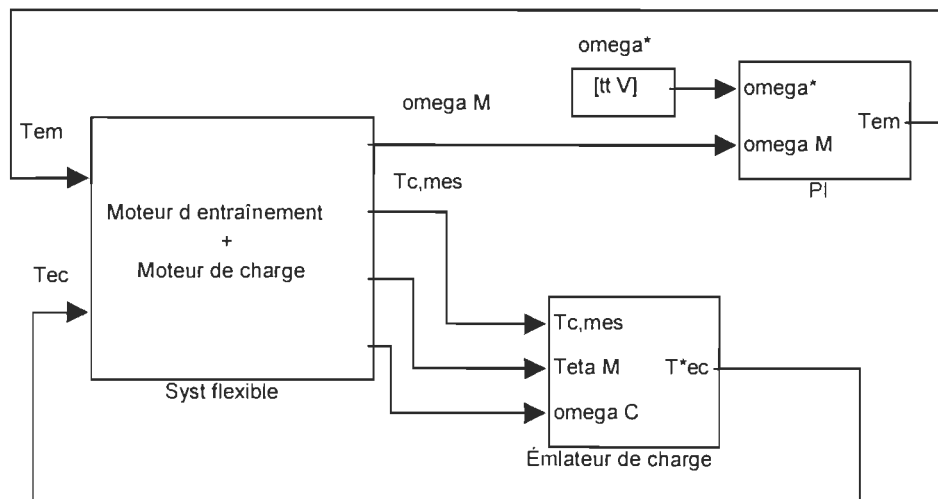
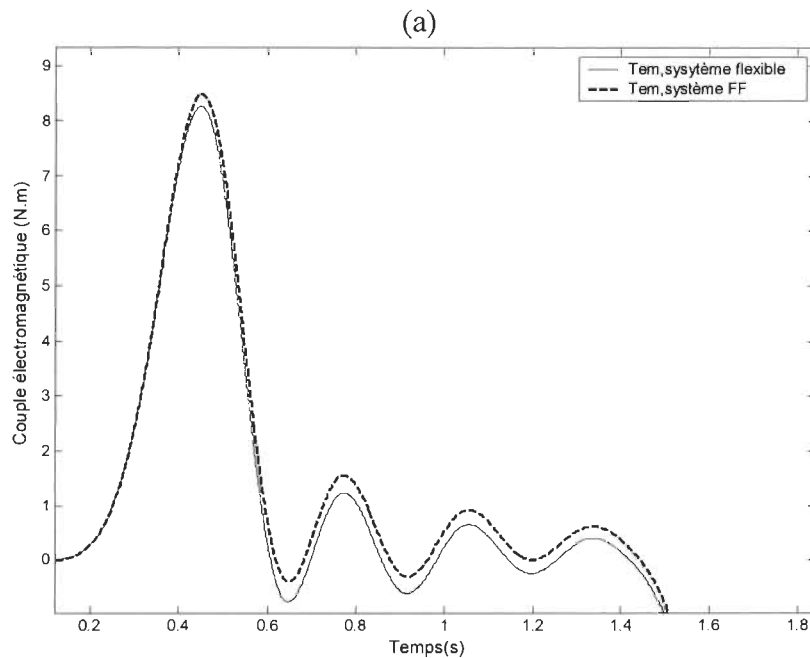
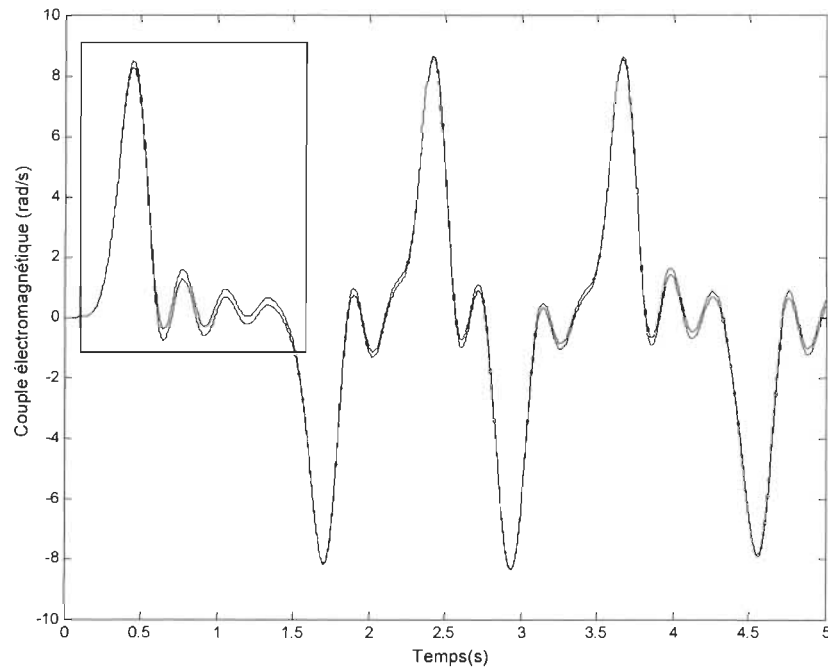


Fig.4.16 : Schéma général du système FF, modèle linéaire

Le modèle de la figure 4.12 représente un système physique avec couplage flexible et les caractéristiques désirées de la charge. En changeant la constante de rigidité k de ce système par la constante de rigidité désirée k_1 , nous pourrions valider le système FF (voir annexe F.1).

La figure 4.17 présente les deux couples électromagnétiques du moteur d'entraînement pour le modèle avec couplage flexible sans émulateur de charge et le système FF avec le modèle linéaire.

La figure 4.18 présente une partie de l'erreur du couple électromagnétique du moteur d'entraînement. La figure F.6 présente l'erreur de vitesse du moteur d'entraînement entre le système RF et le système physique sans émulateur (voir annexe F.1).



(b)
Fig.4.17 : Couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle linéaire (FF)

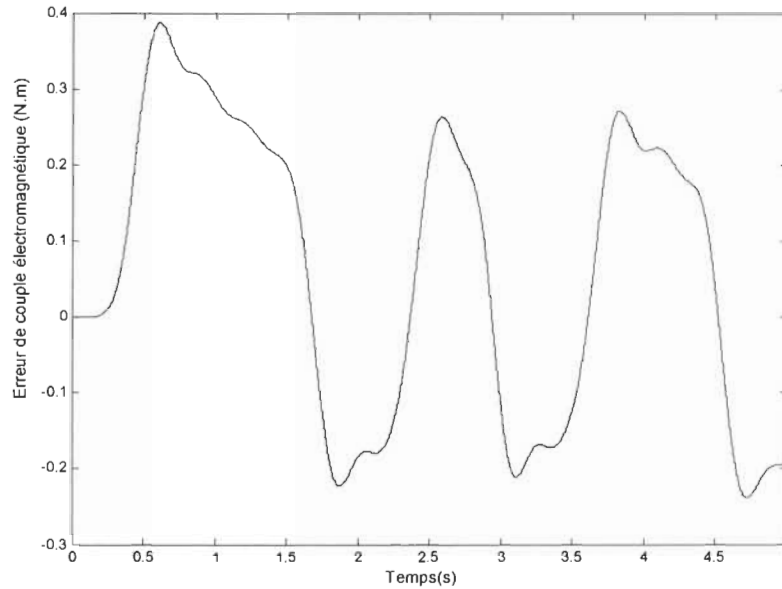


Fig.4.18 : Erreur de couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle linéaire (FF)

On remarque que l'erreur est faible, ce qui nous amène à dire que le système FF se comporte comme un système flexible avec les caractéristiques de la charge désirée et le degré de flexibilité désiré.

4.5. Conclusions

Dans ce chapitre nous avons développé les lois de commande de la charge mécanique programmable dans les quatre cas de couplage (RR-FR-RF-FF). Une validation de ces quatre lois de commande est appliquée aux modèles linéaires déjà développés.

L'implantation de ces quatre lois de commande dans les modèles non-linéaires de PSB sera développée dans le chapitre suivant. Quelques tests sur l'effet des variations des paramètres de la charge seront réalisés.

CHAPITRE V :

RÉSULTATS DE SIMULATION DE LA CHARGE MÉCANIQUE PROGRAMMABLE

Les modèles non-linéaires de «Power Systems Blockset» (PSB) [2], nous permettent de valider les lois de commande déjà développées dans le chapitre IV et testées avec les modèles linéaires. Les blocs de PSB représentent mieux le comportement non linéaire du système d'émulation de charges mécaniques dans des conditions beaucoup plus réalistes.

5.1. Simulation sous Power System Blockset

Les modèles PSB contiennent des modèles plus complets des moteurs qui s'approchent des modèles réels. Ceci nous permettra de valider les lois de commande des modèles linéaires déjà

développées sur des modèles plus réalistes, pour les quatre structures proposées, à savoir : rigide-rigide, flexible-rigide, rigide-flexible et flexible-flexible.

5.1.1. Couplage rigide-rigide (RR) :

La réalisation du système RR avec des modèles non-linéaires requiert l'utilisation des modèles de PSB et SIMUPELS [3], pour l'émulateur de charge développé sur le système RR du modèle linéaire. SIMUPELS est une librairie de modèles de systèmes électroniques de puissance qui a été développée à l'UQTR en 1992. La stratégie d'émulation reste la même sauf au niveau de l'équation mécanique qui est omise sur le modèle du moteur de la charge, modélisé avec le bloc moteur de SIMUPELS. Ce moteur de charge reçoit la variable de vitesse à partir du modèle du moteur sous test (représenté par le bloc moteur de PSB). Cette considération est valide vu que les deux machines sont couplées rigidement et tournent donc exactement à la même vitesse. Les équations électriques du côté de la charge sont préservées dans le modèle d'où l'équation (4.2) qui permet de calculer le couple mécanique mesuré ($T_{C,mes}$) défini comme suit:

$$T_{C,mes} = J_C \ddot{\theta}_C + F_C \dot{\theta}_C - T_{eC} \quad (5.1)$$

On ajoute un filtre passe-bas sur le couple mécanique ($T_{C,mes}$) et la vitesse du moteur d'entraînement $\dot{\theta}_M$, afin d'avoir la même constante de temps de mesure pour tout le système. Ceci introduit donc un filtre sur le terme en accélération de la charge dans (5.1) afin d'éliminer le besoin d'employer un accéléromètre.

Le système RR utilise donc le modèle SIMUPELS de la machine asynchrone en association avec le modèle PSB du reste du système d'émulation. Les modèles SIMUPELS sont faciles à modifier à l'encontre des modèles PSB. Pour ce qui est des régulateurs et des lois de commande, nous avons gardé les mêmes contrôleurs développés pour les modèles linéaires.

Le schéma de l'émulateur de charge avec couplage rigide-rigide, dans l'environnement SIMULINK est présenté à la figure 5.1 (voir annexe C.2).

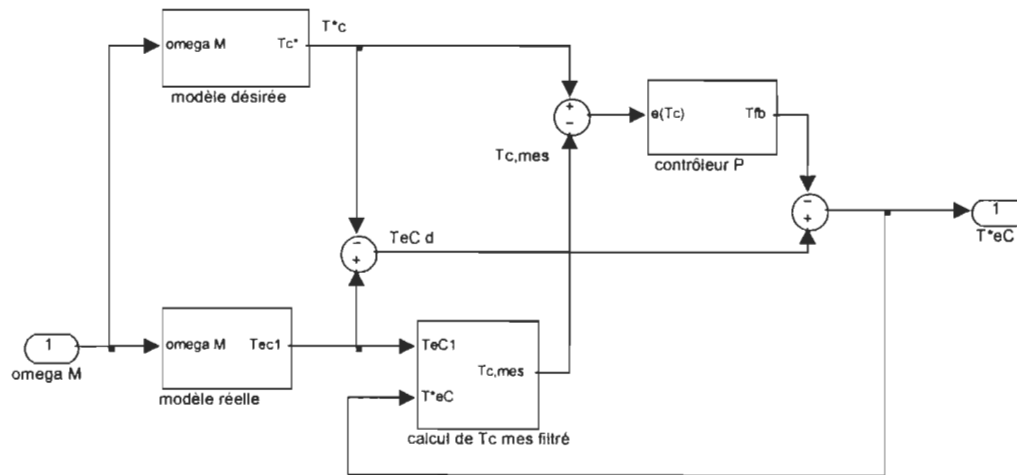


Fig.5.1 : Schéma de l'émulateur de charge pour le couplage RR, modèle PSB

Le schéma général d'un système rigide-rigide sous PSB est illustré à la figure 5.2.

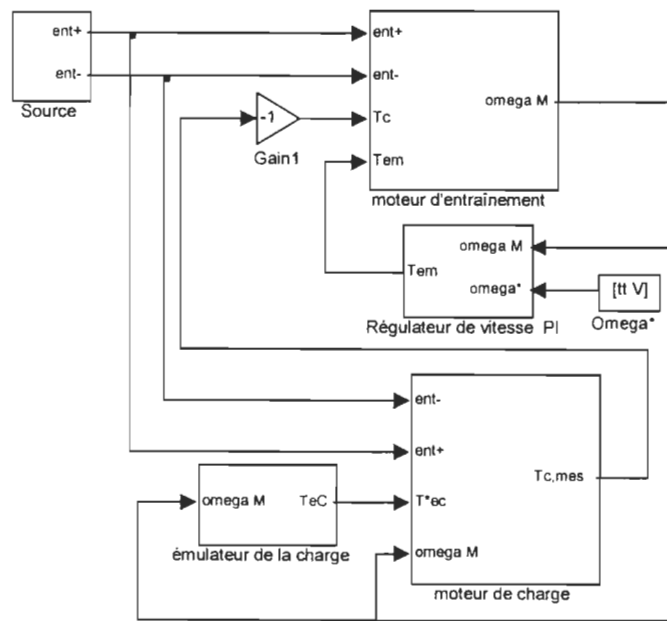


Fig.5.2 : Schéma général du système RR, modèle PSB

Nous proposons un système complet sur PSB, qui représente un système physique ayant un couplage rigide avec régulateur de vitesse et sans émulateur de charge. L'inertie et le frottement de la charge sont ceux de la charge désirée. Cette configuration est illustrée à la figure 5.3.

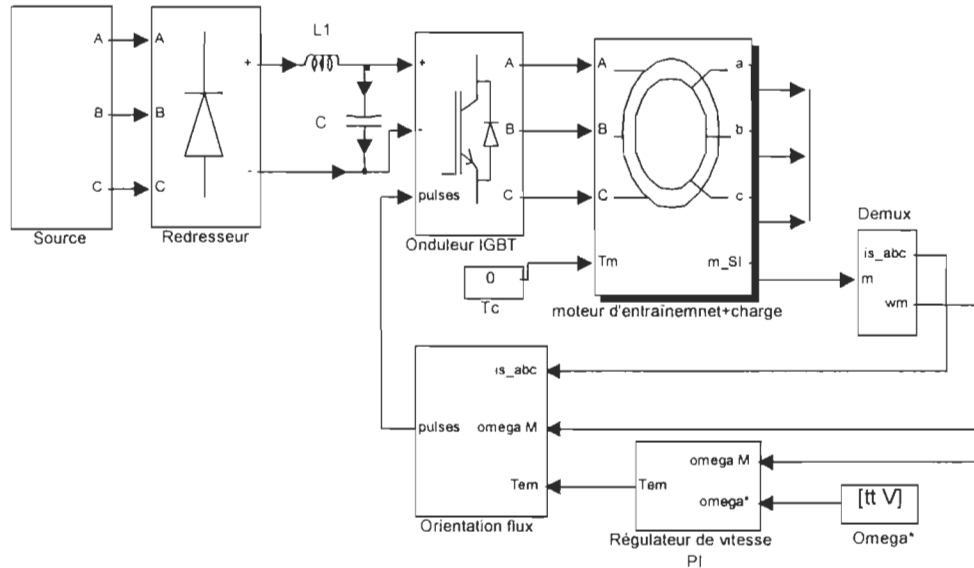
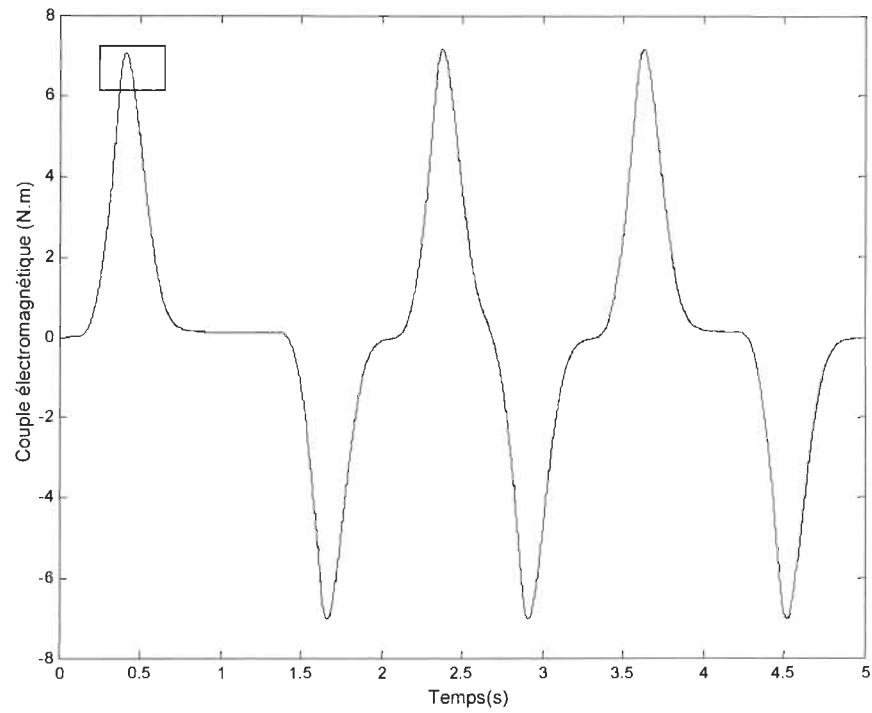


Fig.5.3 : Schéma d'un système physique avec couplage rigide sans émulateur, modèle PSB

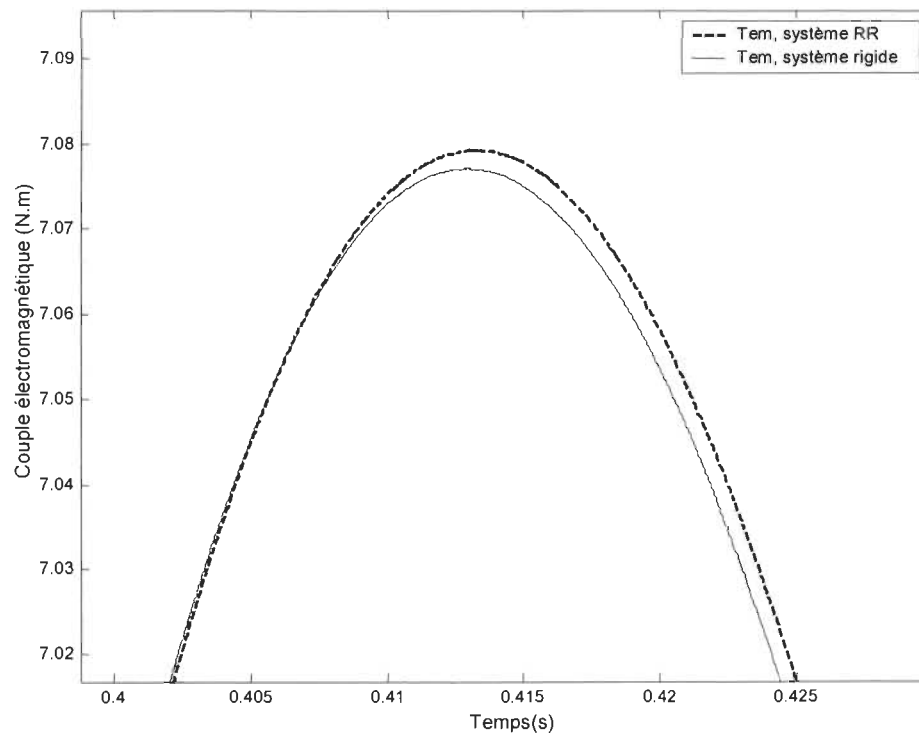
Ce modèle nous permet de valider la loi de commande du système RR afin que ce dernier se comporte comme un système physique couplé rigidement et exhibant les caractéristiques de la charge désirée.

La figure 5.4 présente les deux couples électromagnétiques du moteur d'entraînement pour le système avec couplage rigide sans émulateur de charge et le système RR sous PSB.

La figure 5.5 présente l'erreur du couple électromagnétique du moteur d'entraînement entre le système RR et le système physique avec couplage rigide sans émulateur de charge (voir annexe C.2).



(a)



(b)

Fig.5.4 : Couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle PSB (RR)

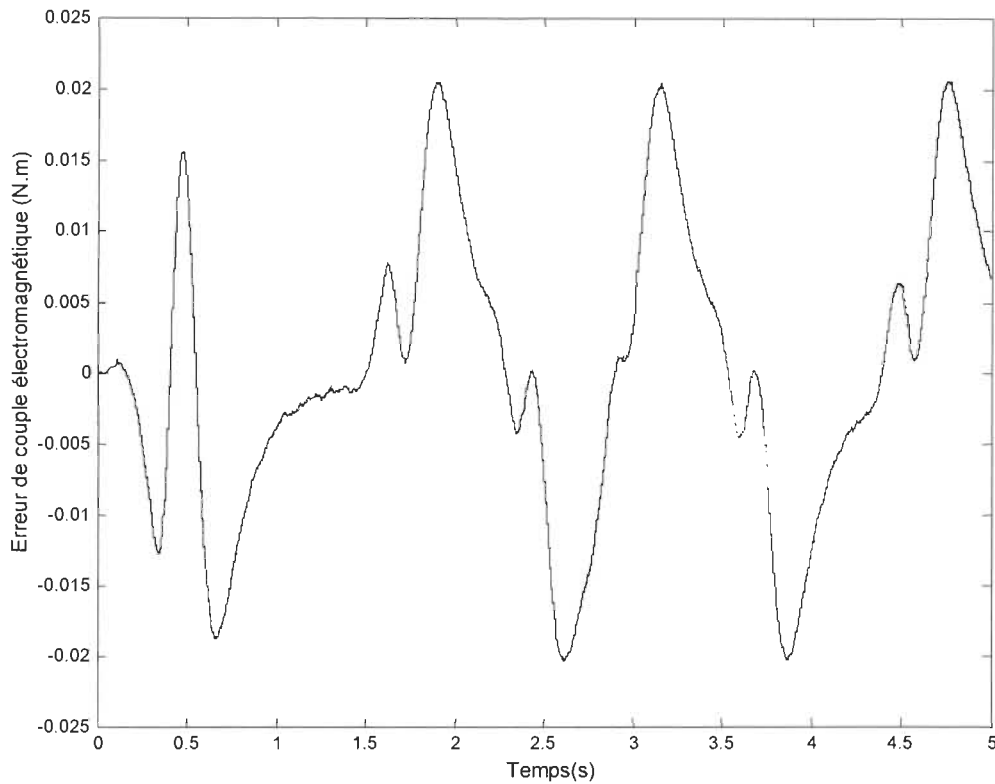


Fig.5.5 : Erreur de couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle PSB (RR)

D'après la figure 5.5, l'erreur du couple est faible et tend vers zéro quand la consigne est constante. On peut conclure que le système RR se comporte comme un système physique ayant un couplage rigide et caractéristique de la charge désirée.

En comparant l'erreur du couple électromagnétique dans le modèle PSB avec celle du modèle linéaire, on remarque que l'amplitude de l'erreur avec le modèle PSB est environ 4 fois plus grande et que son comportement dynamique est plus lent.

5.1.2. Couplage flexible-rigide (FR) :

Le système flexible sous PSB, avec émulateur de charge tel que le couple mécanique mesuré est défini par l'équation (4.14) et présenté à la figure 5.6, qui correspond au schéma général du système FR (voir annexe D.2).

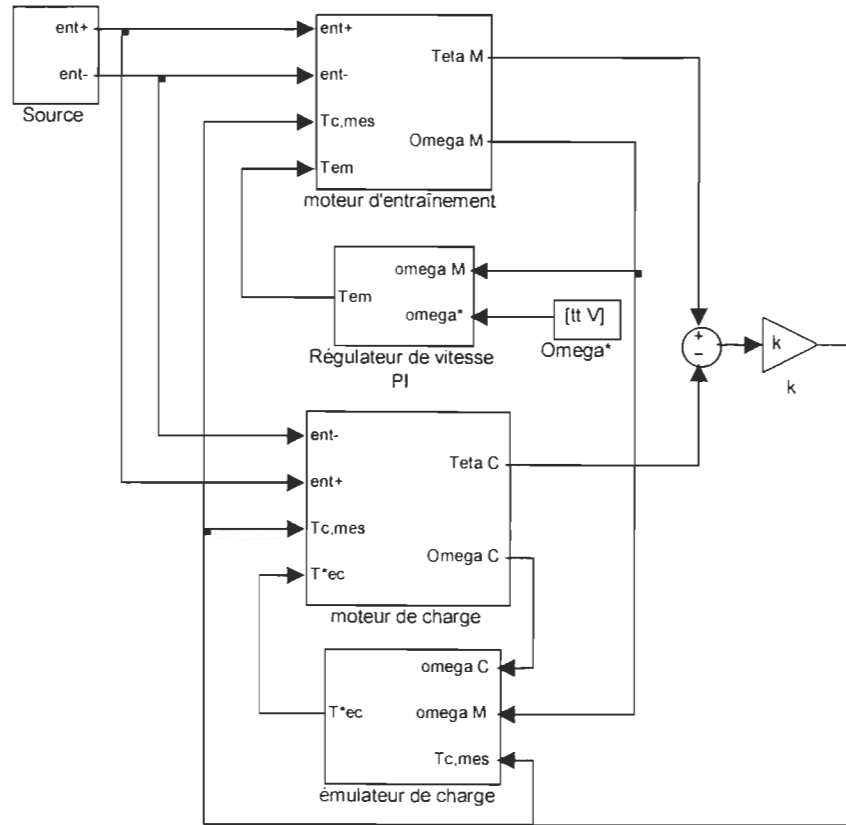


Fig.5.6 : Schéma général du système FR, modèle PSB

Le modèle de la figure 5.3 nous permet de valider le système FR.

La figure 5.7 présente les deux couples électromagnétiques du moteur d'entraînement d'un système avec couplage rigide sans émulateur de charge et du système FR sous PSB.

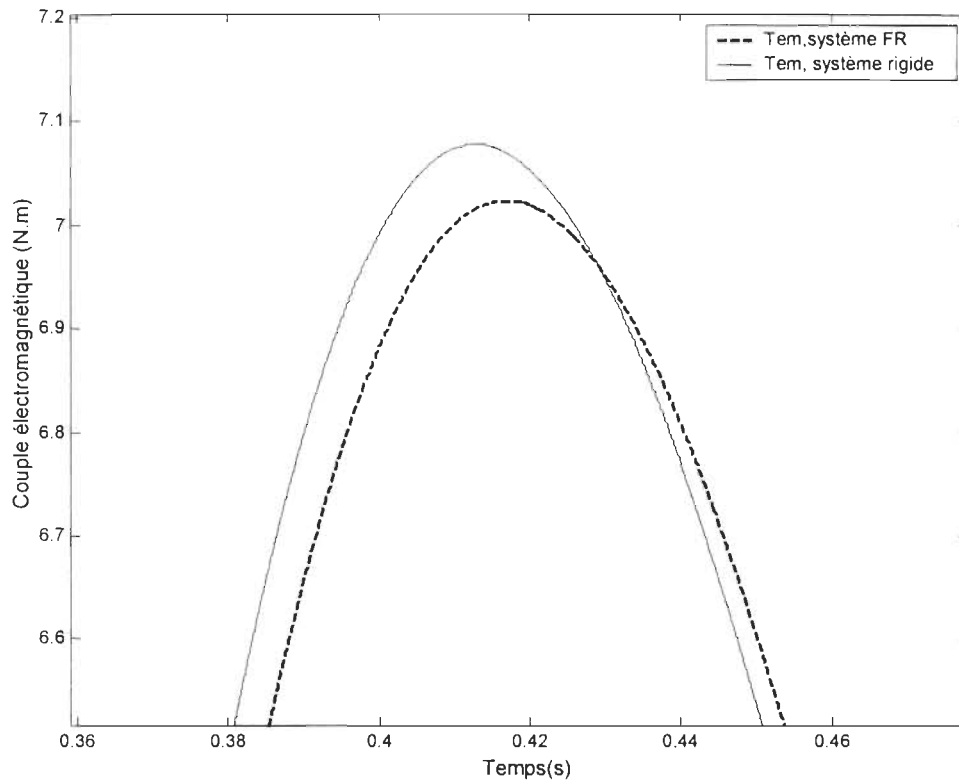


Fig.5.7 : Couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle PSB (FR)

L'erreur du couple électromagnétique du moteur d'entraînement qui correspond à la différence entre le modèle avec couplage rigide sans émulateur et le système FR est illustrée à la figure 5.8 (voir annexe D.2).

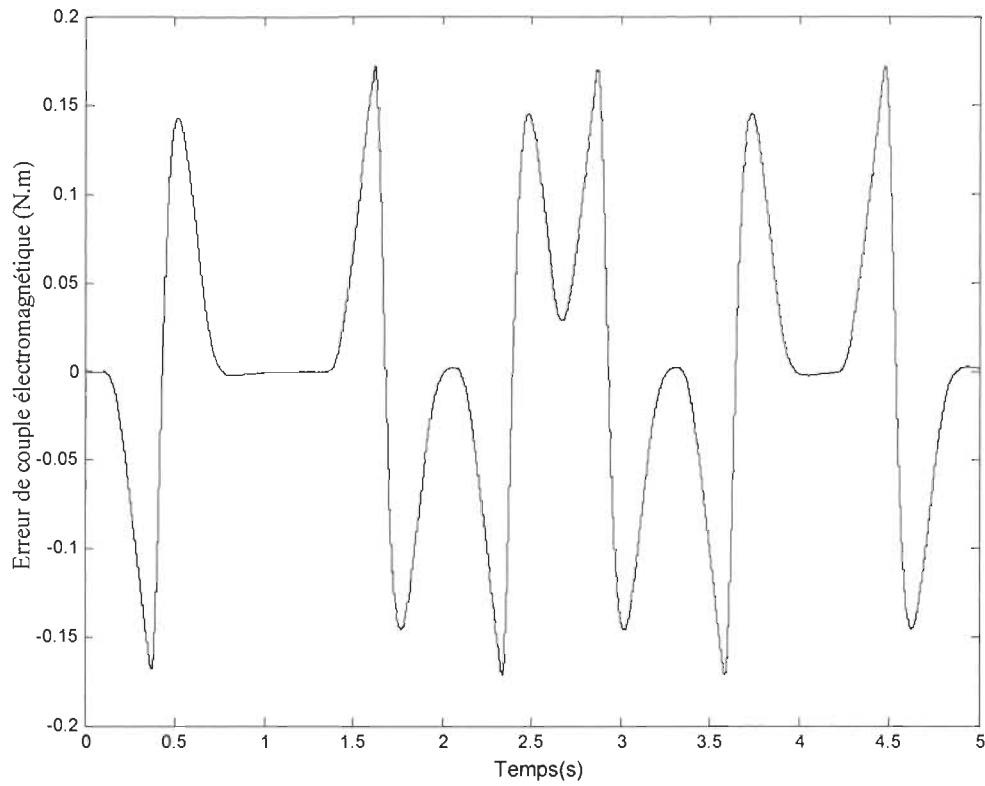


Fig.5.8 : Erreur de couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle PSB (FR)

On remarque que l'erreur converge vers zéro lorsque la consigne de vitesse est constante, cependant le système FR se comporte comme un système à couplage rigide ayant les caractéristiques de la charge désirée car l'erreur du couple électromagnétique dans le cas du système FR est faible.

L'erreur du couple électromagnétique est comparable en amplitude et en rapidité dans les deux modèles PSB et linéaire ce qui nous permet de dire que l'émulateur se comporte très bien dans le cas linéaire et non linéaire.

5.1.3. Couplage rigide-flexible (RF) :

Le système RF est présenté sous forme de blocs PSB et SIMUPELS. L'équation (5.1) définit le couple mécanique mesuré et la figure 5.9 présente le schéma général du système RF sous PSB/SIMUPELS (voir annexe E.2).

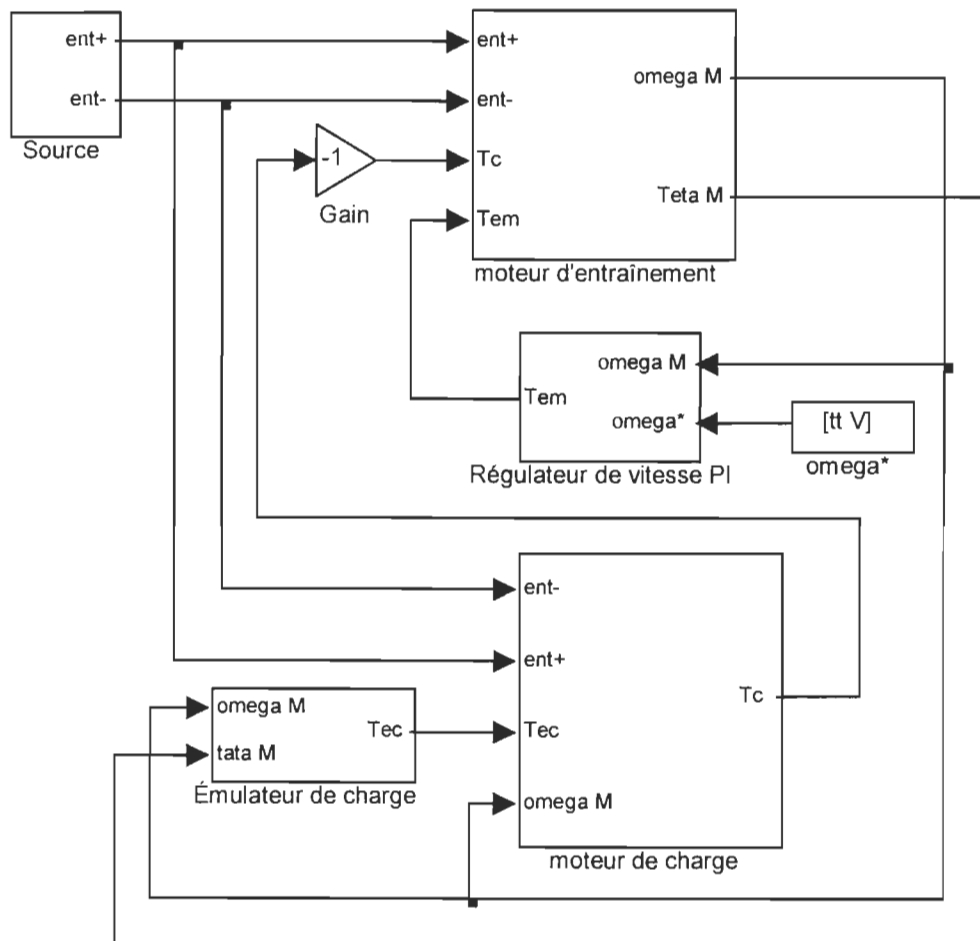


Fig.5.9 : Schéma général du système RF, modèle PSB

Un système physique avec couplage flexible sans émulateur de charge et avec régulateur de vitesse est proposé dans la figure 5.10. L'inertie et le frottement de la charge désirée sont employés dans ce modèle (voir annexe E.2).

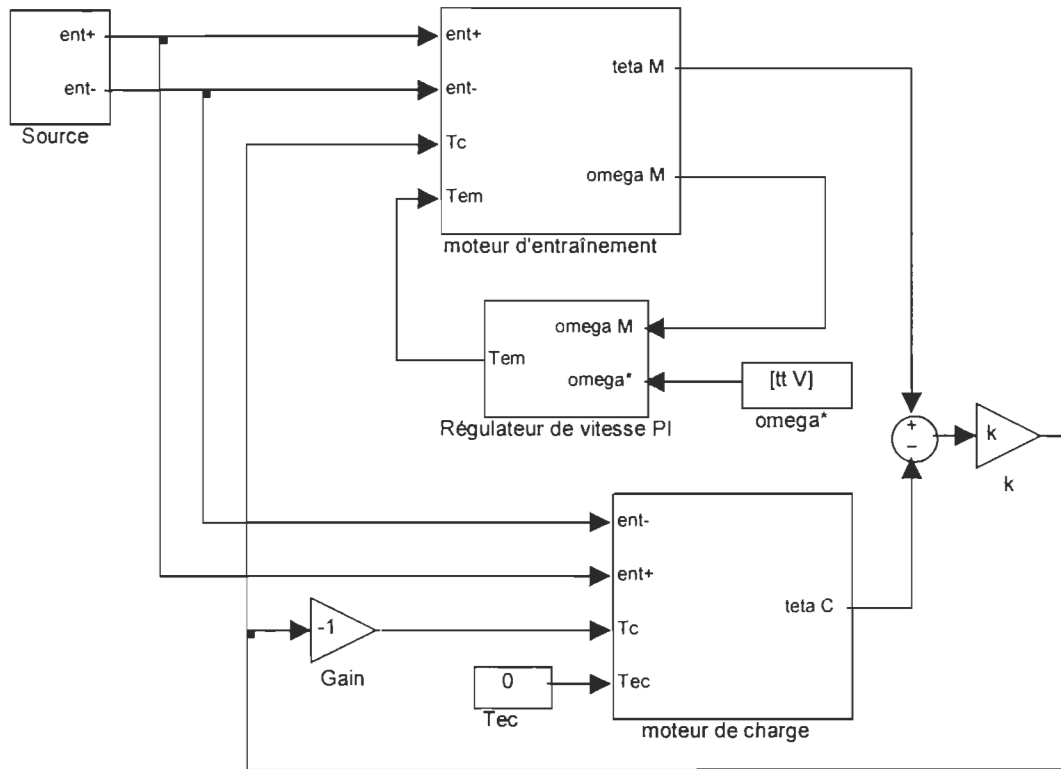
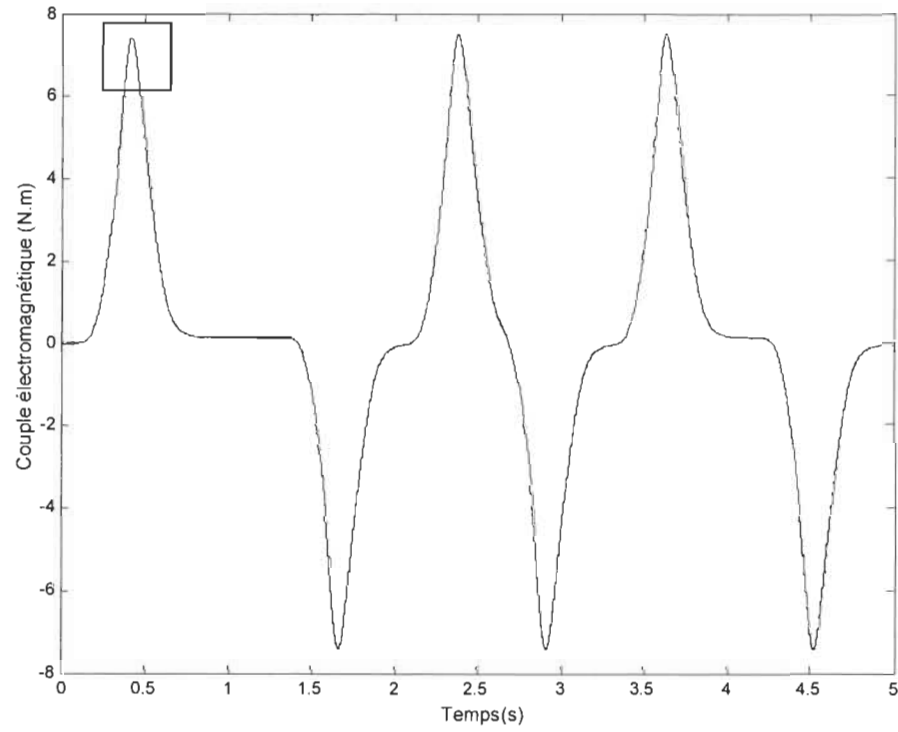


Fig.5.10 : Schéma physique avec couplage flexible sans émulateur, modèle PSB/SIMUPELS

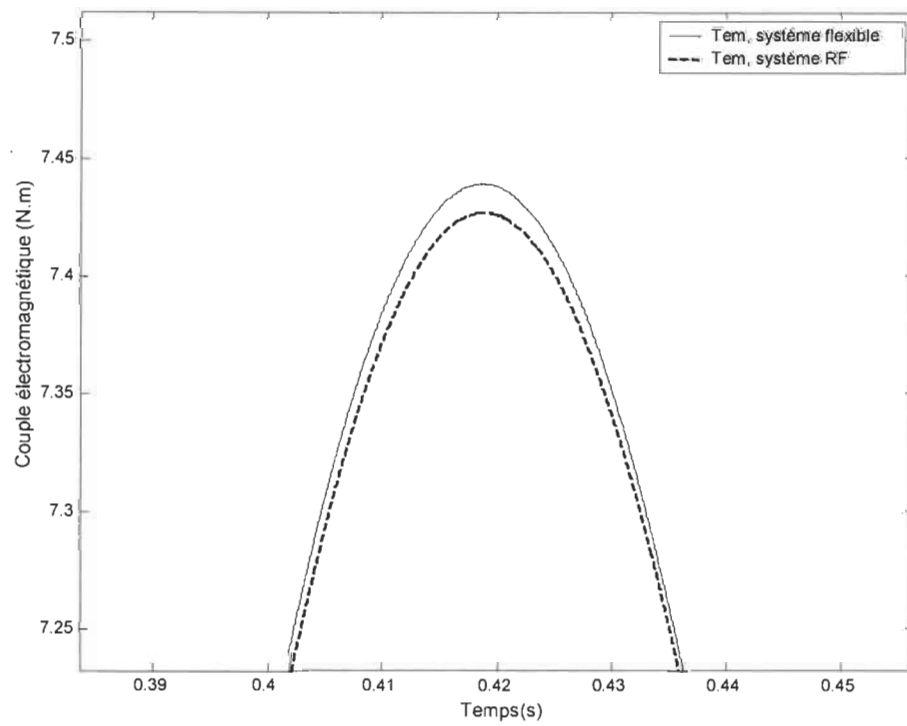
Ce modèle nous permet de valider la loi de commande du système RF afin que ce dernier se comporte comme un système physique avec couplage flexible et exhibant les caractéristiques de la charge désirée.

La figure 5.11 présente les deux couples électromagnétiques du moteur d'entraînement du système avec couplage flexible sans émulateur de charge et du système RF sous PSB.

L'erreur du couple électromagnétique du moteur d'entraînement, est présentée à la figure 5.12 (voir annexe E.2).



(a)



(b)

Fig.5.11 : Couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle PSB (RF)

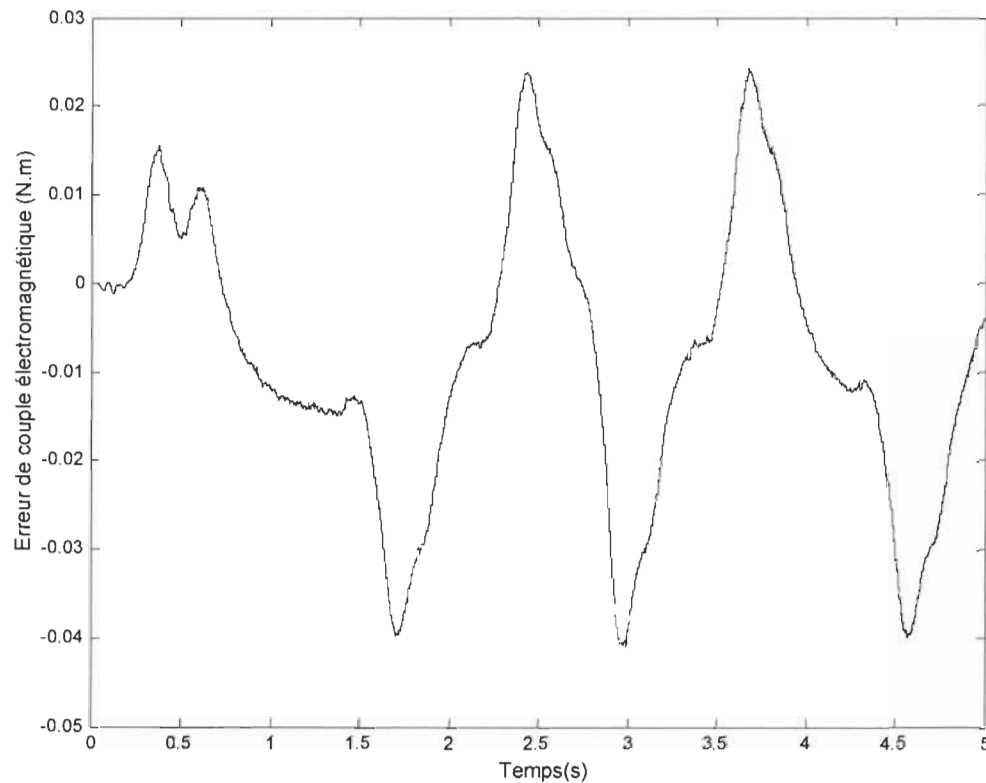


Fig.5.12 : Erreur de couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle PSB/SIMUPELS (RF)

On remarque que l'erreur du couple électromagnétique est faible. Cependant le système RF se comporte comme un système physique avec couplage flexible ayant les caractéristiques de la charge désirée.

L'erreur du couple électromagnétique dans le modèle PSB est plus élevée que celle du couple électromagnétique dans le modèle linéaire par un facteur d'environ 80. Il faut cependant remarquer que dans le cas linéaire, cette erreur était très faible. Le comportement dynamique de l'erreur est aussi plus lent. Les différences sont sûrement dues à la non-linéarité du modèle, en particulier au niveau de la commande de l'onduleur et de la loi d'orientation de flux.

5.1.4 Couplage flexible-flexible (FF):

Le système FF est représenté par les modèles PSB. L'émulateur de charge du modèle linéaire est présenté à la figure 4.12 et le couple mécanique mesuré est défini par l'équation (4.14). La figure 5.10 présente le schéma général du système FF sous PSB (voir annexe F.2)

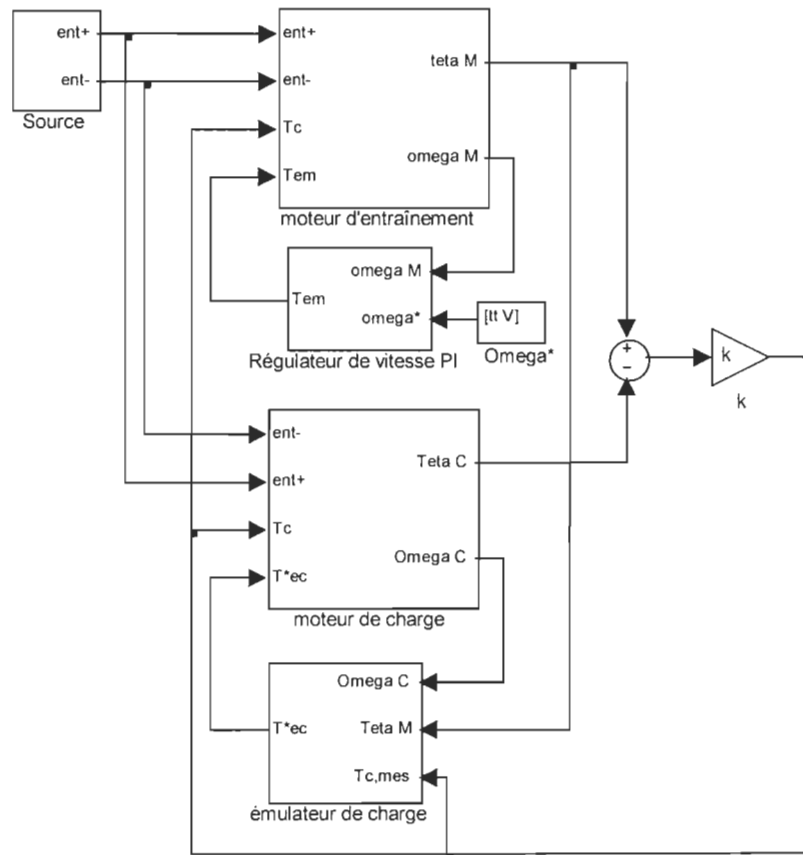
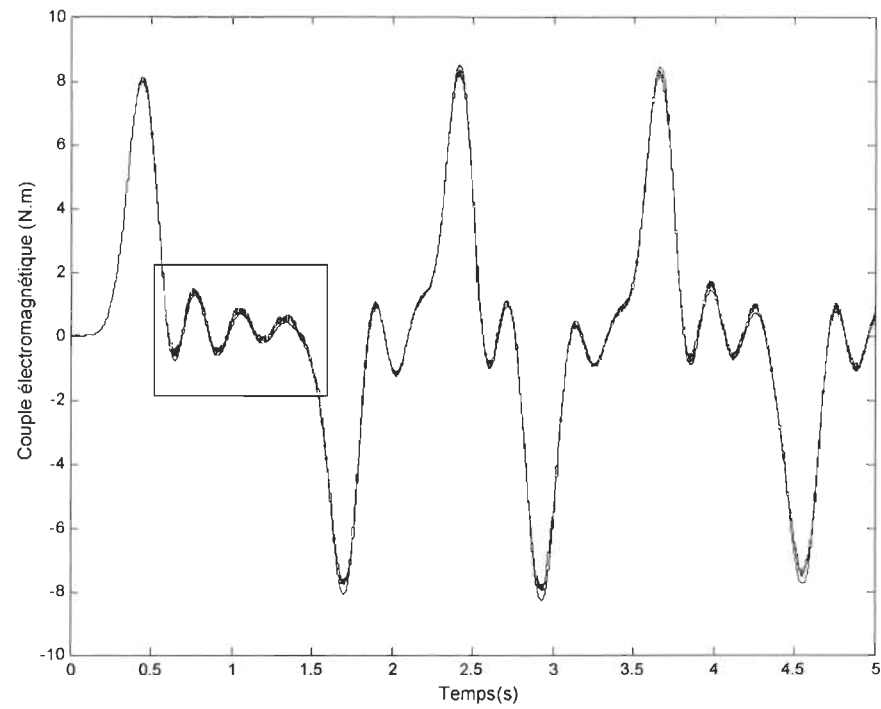


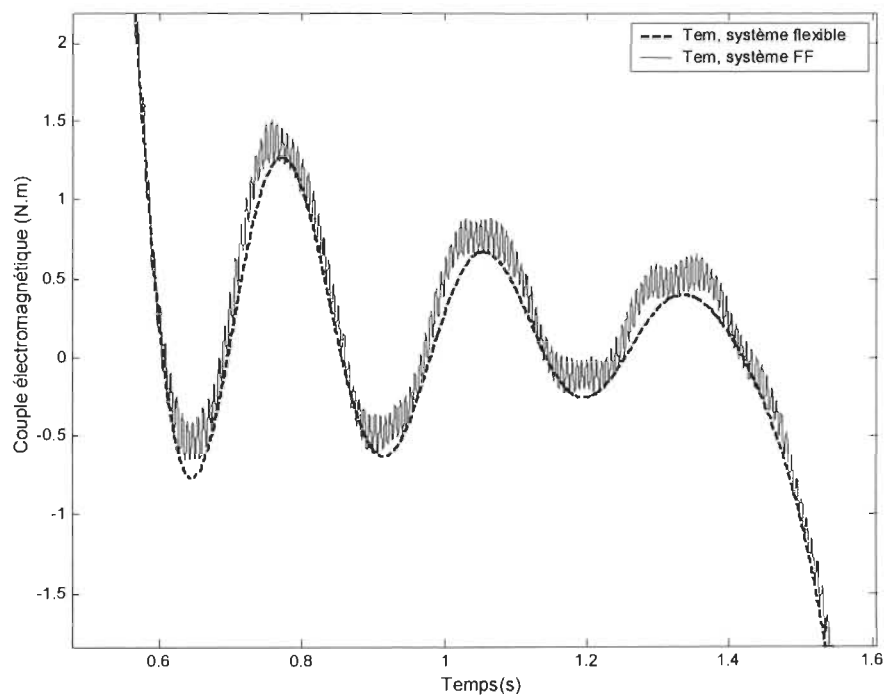
Fig.5.13 : Schéma général du système FF, modèle PSB

Pour valider le système FF, il suffit juste de remplacer la constante de rigidité k par la constante de rigidité désirée k_1 dans la figure 5.10 qui représente le système physique avec couplage flexible et caractéristiques de la charge désirée.

La figure 5.14 présente les deux couples électromagnétiques du moteur d'entraînement du système avec couplage flexible sans émulateur de charge et du système FF sous PSB.



(a)



(b)

Fig.5.14 : Couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle PSB (FF)

La figure 5.15 présente l'erreur du couple électromagnétique du moteur d'entraînement sous PSB (voir annexe F.2)

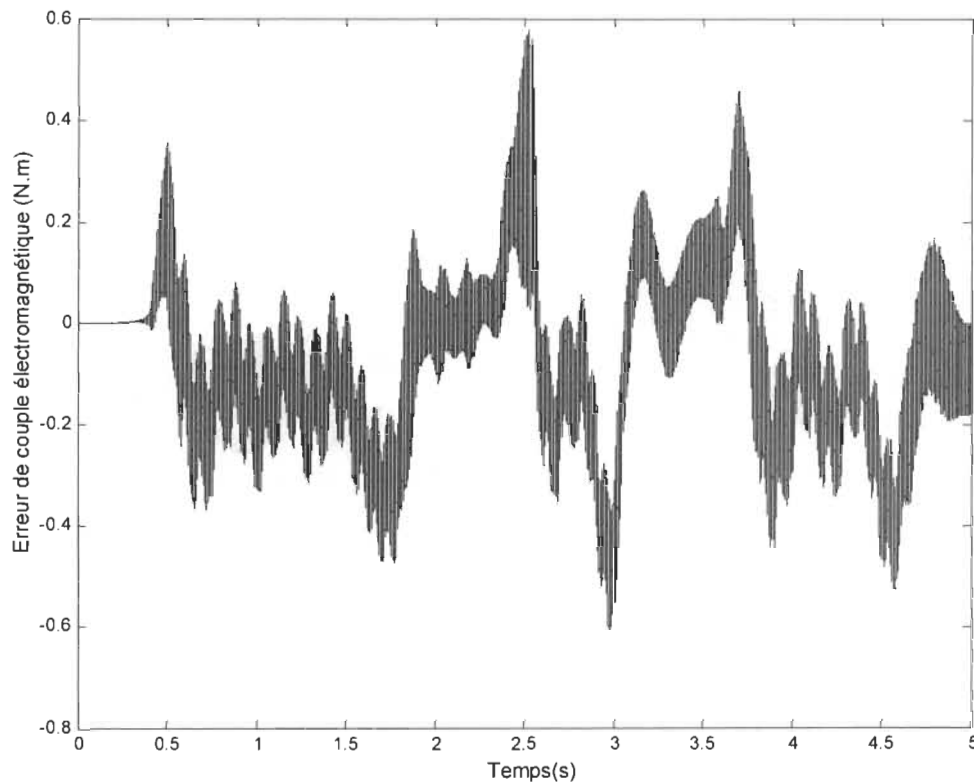


Fig.5.15 : Erreur de couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle PSB (FF)

L'erreur de la figure 5.15 présente des oscillations dues aux non-linéarités du modèle puisque ces oscillations à haute fréquence n'étaient pas présentes dans le cas linéaire. Étant donné que l'erreur est faible, le système FF se comporte comme un système physique avec couplage flexible doté des caractéristiques désirées de la charge et de la flexibilité désirée.

En comparant l'erreur du couple électromagnétique du modèle PSB à celle du modèle linéaire, nous constatons que l'erreur est de 20% plus élevée que dans le modèle linéaire avec la présence d'oscillations.

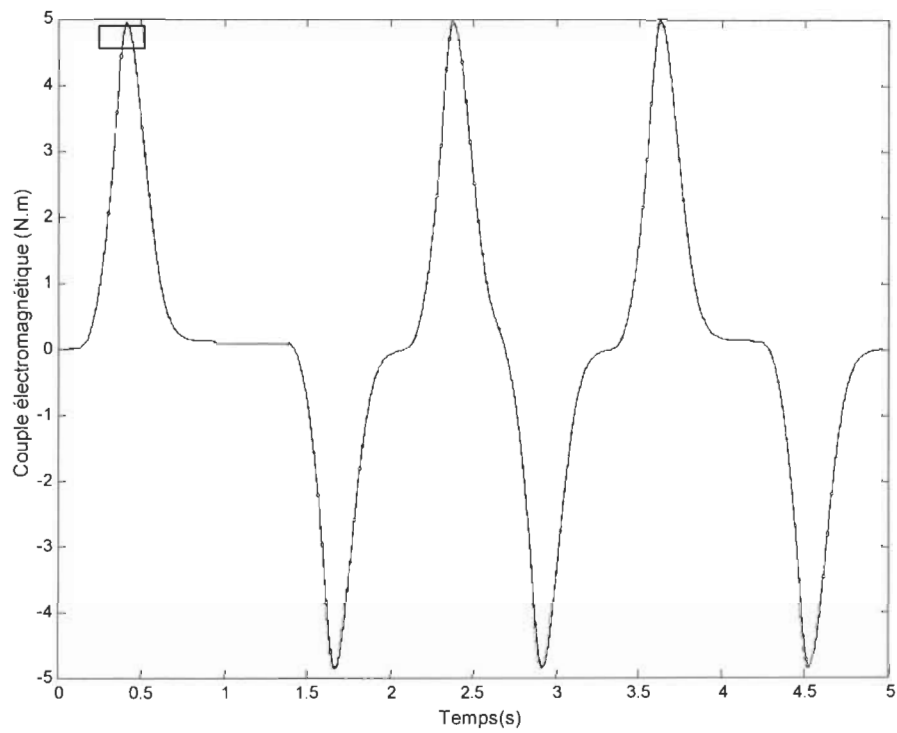
5.2. Effet des variations des paramètres de la charge

Afin de mieux valider notre émulateur, nous proposons de varier les paramètres de la charge (inertie et frottement) désirée en diminuant ou en augmentant ces derniers de 50%, dans l'un des quatre cas présentés à la section 5.1.

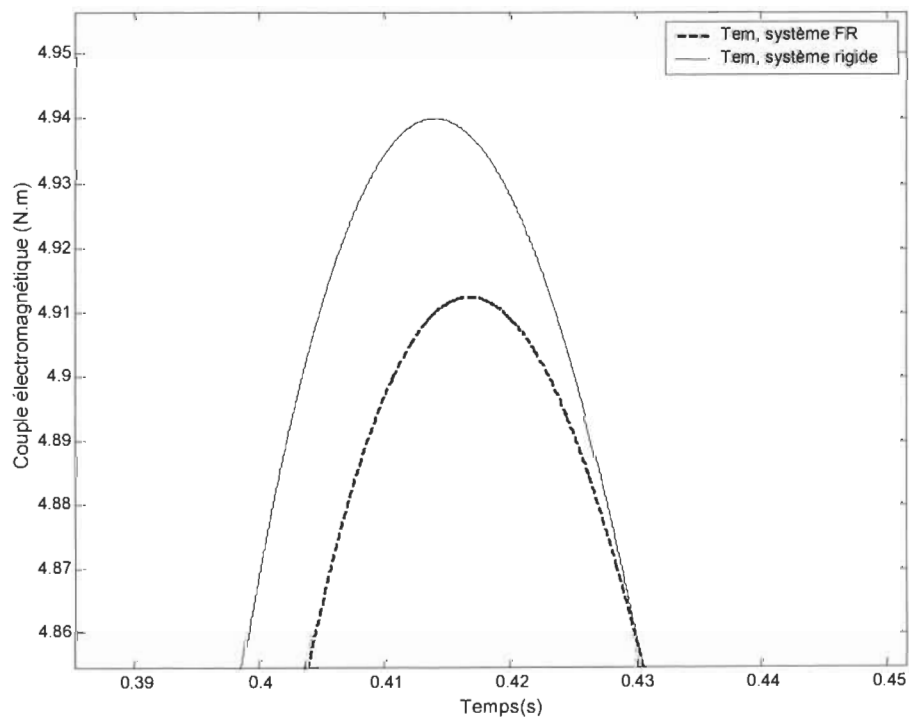
Nous proposons le système FR pour effectuer la variation des paramètres de la charge. La figure 5.6 présente le schéma général du système FR sous PSB. Les paramètres de simulation sont présentés à l'annexe D.3.

La figure 5.16 présente le couple électromagnétique du moteur d'entraînement du système rigide et le système FR avec une diminution de 50% de l'inertie et le frottement de la charge.

La figure 5.17 présente l'erreur du couple électromagnétique du moteur d'entraînement sous PSB (FR), avec une diminution de 50% de l'inertie et du frottement de la charge (voir annexe D.3).



(a)



(b)

Fig.5.16 : Couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle PSB (FR), avec une diminution de 50% de la charge

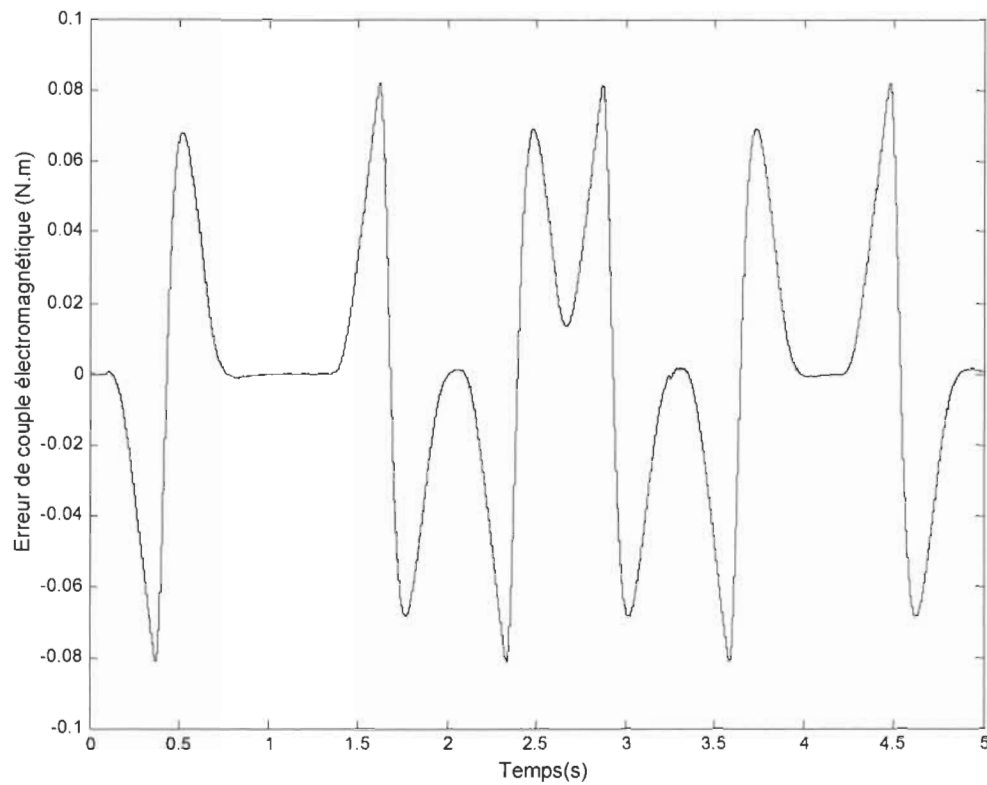
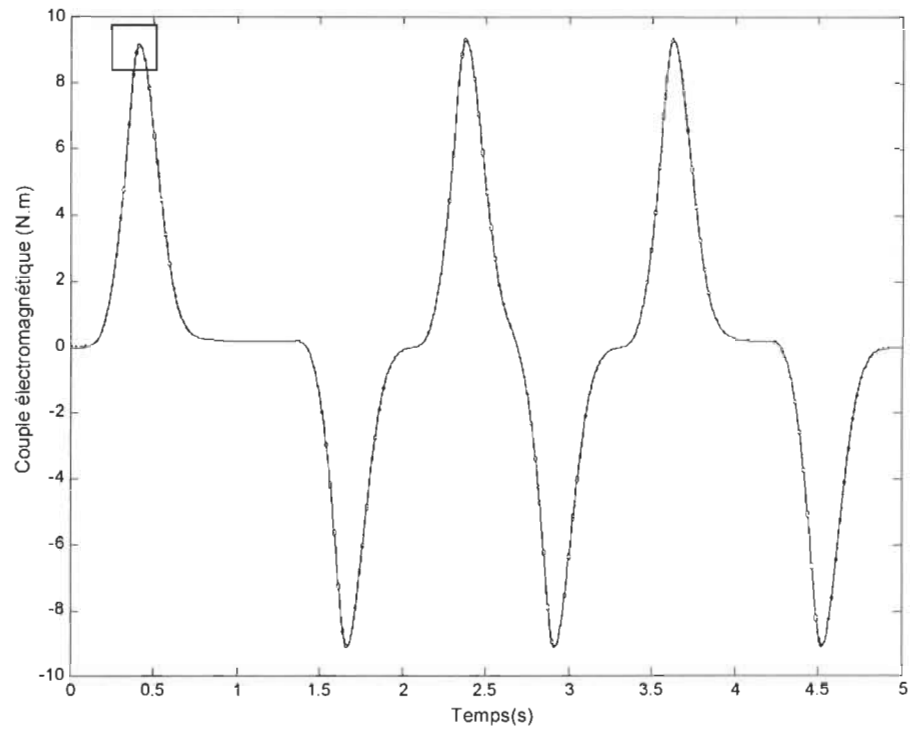


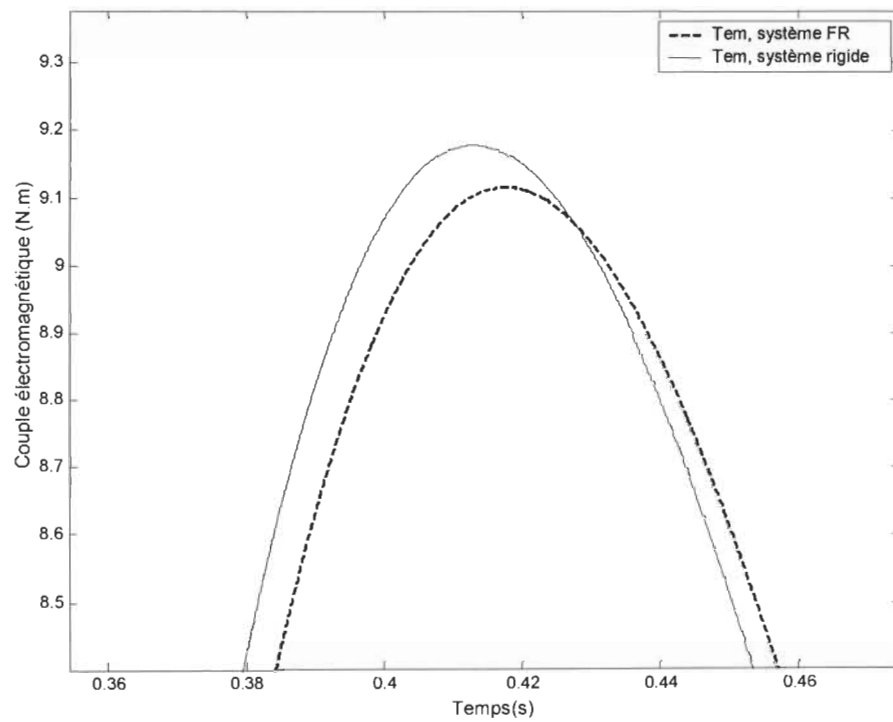
Fig.5.17 : Erreur de couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle PSB (FR) avec une diminution de 50% de la charge

La figure 5.18 présente le couple électromagnétique du moteur d'entraînement du système rigide et le système FR avec une augmentation de 50% de l'inertie et du frottement de la charge.

La figure 5.19 présente l'erreur du couple électromagnétique du moteur d'entraînement sous PSB (FR), avec une augmentation de 50% de l'inertie et du frottement de la charge (voir annexe D.3)



(a)



(b)

Fig.5.18 : Couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle PSB (FR), avec une augmentation de 50% de la charge

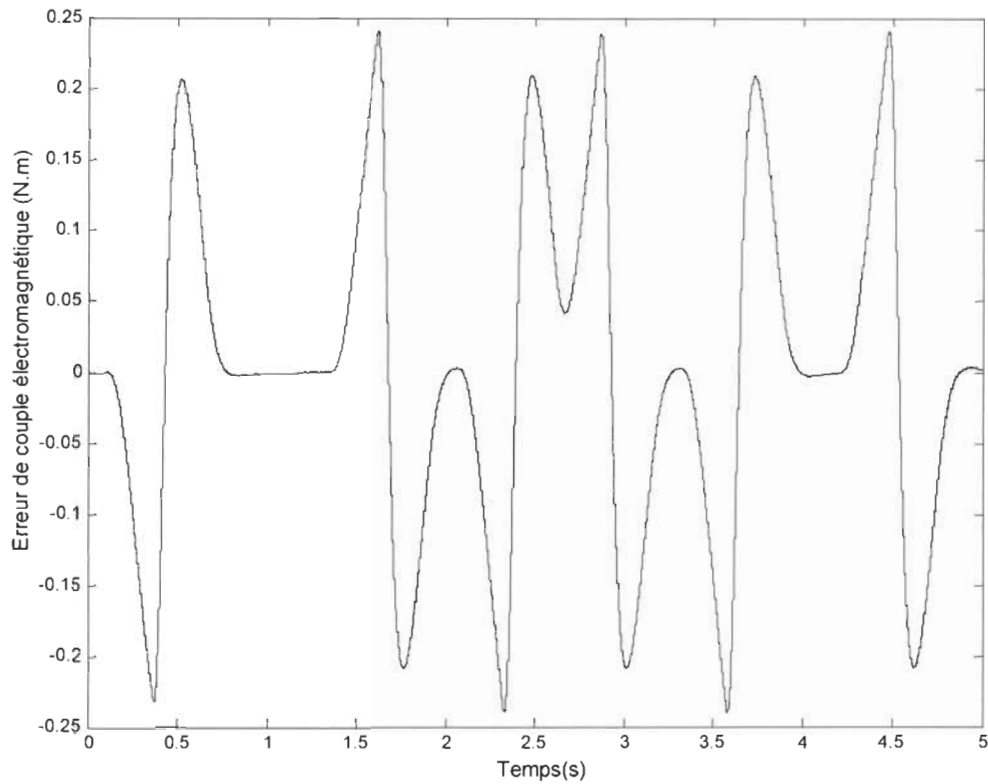


Fig.5.19 : Erreur de couple électromagnétique du moteur d'entraînement, modèle PSB (FR) avec une augmentation de 50% de la charge

On compare l'erreur du couple électromagnétique sous PSB du système FR avec une diminution de 50% des paramètres de la charge présentée dans la figure 5.17 avec l'erreur du couple électromagnétique dans le modèle PSB du système FR présentée dans la figure 5.8. On remarque alors que l'erreur de la figure 5.17 est de 10% plus faible que celle de la figure 5.8 à cause de la diminution des paramètres de la charge. En augmentant par contre les paramètres de la charge dans la figure 5.19, nous constatons que l'erreur est de 5% plus élevée que celle présentée dans la figure 5.8.

Malgré les variations des paramètres de la charge, on remarque que l'émulateur fonctionne très bien et les deux systèmes se comportent alors comme un système avec couplage rigide et les caractéristiques désirées.

5.3. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats de simulation des quatre structures (RR, FR, RF et FF) de modèles non-linéaires, utilisant les blocs de PSB et de SIMUPELS.

Nous avons ainsi validé les stratégies de commande traitées dans le chapitre précédant en observant des erreurs plus grandes, mais encore faibles sur les couples d'émulation. Les variations de comportement les plus importantes ont été observées dans le cas de systèmes initialement rigides. Ces erreurs sont probablement dues à une interaction plus grande des moteurs dans ce cas.

Nous avons par ailleurs effectué deux tests sur l'effet de la variation des paramètres de la charge désirée dans le modèle flexible-rigide afin de confirmer que les lois de commande ne sont pas spécifiques à un point de fonctionnement donné.

Nous concluons que les systèmes étudiés se comportent, avec des erreurs minimales, de la même façon que les systèmes désirés.

CHAPITRE VI :

CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

Dans ce mémoire nous avons apporté une contribution au développement de lois de commande d'une charge mécanique programmable de haute performance pour l'émulation des charges motrices industrielles. Nous avons présenté la modélisation et la simulation d'une charge mécanique programmable et de sa loi de commande pour une charge inertielle avec frottement visqueux pour différents types de couplage entre la charge mécanique programmable et le moteur d'entraînement.

Nous avons d'abord effectué une étude sur l'émulation des charges industrielles et décrit le besoin de l'émulateur, ainsi que les différents modèles des charges industrielles et les différents types d'émulateurs de charges proposés dans la littérature, et qui restent quand même rares. Le principe des approches de commande proposées en boucle ouverte (commande anticipative) et

en boucle fermée qui nous permettent de reproduire le comportement d'une charge réelle a été détaillé. Nous avons également présenté une étude analytique générale dans le chapitre III de deux types de couplages (rigide et flexible) appliqués à deux modèles (linéaire et non linéaire). Ces modèles nous ont permis de faire la conception de l'émulateur de charge pour les différents types de couplage alors que la simulation des modèles linéaires pour le système rigide et flexible nous a permis de valider les équations développées pour les systèmes rigides et flexibles.

La conception des lois de commande pour les systèmes rigides et flexibles a été un objectif principal dans ce mémoire. Des lois de commande ont été développées pour les quatre cas de couplages possibles entre le moteur d'entraînement et la charge, à savoir les couplages rigide-rigide, rigide-flexible, flexible-rigide et flexible-flexible [13]. Ces lois de commande ont été validées d'abord à l'aide de modèles linéaires de la charge mécanique programmable, puis confirmées avec des modèles plus réalistes et complets en utilisant les blocs de la boîte à outils «Power System Blockset» de SIMULINK et du module SIMUPELS. Les résultats des simulations ont mis en relief les bonnes performances des lois de commande proposées pour les différents cas de couplage. La robustesse de ces lois de commande a été illustrée par les tests effectués sur l'effet des variations des paramètres de la charge de plus ou moins 50%.

Dans tous les cas de couplages considérés, les résultats de simulation de l'émulateur de charge ont été satisfaisants pour les modèles linéaires et non linéaires. Les résultats de simulation avec les modèles non-linéaires ne peuvent cependant pas être considérés comme définitifs. Ils doivent en effet être confrontés à une validation expérimentale grâce à une implantation pratique en temps réel de l'émulateur de charge.

Les perspectives de travaux futurs et complémentaires peuvent porter sur le développement de lois d'émulations pour des charges industrielles plus complexes, non linéaires par exemple. En effet, les charges inertielles avec frottement visqueux que nous avons émulées, autant pour les couplages rigides que flexibles, peuvent être représentés par l'équation suivante :

$$0 = f_{c1}(\theta_c, \dot{\theta}_c, \ddot{\theta}_c) - T^*_c(\theta_c, \theta_M)$$

En choisissant une fonction $f_{c1}(\cdot)$ non-linéaire, ce modèle peut représenter d'autres types de charges, par exemple avec hystérésis ou retour de dents. Une fonction d'ordre plus élevée permettrait aussi de simuler des charges plus complexes. Une difficulté serait de trouver les trajectoires (position, vitesse et accélération) côté charge, comme dans (4.27).

RÉFÉRENCES

- [1] Z.H. Akpolat et G.M. Asher, "Experimental Dynamometer Emulation of Nonlinear Mechanical Loads," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 35, No. 6, Novembre/Décembre 1999, pages 1367–1373.
- [2] R.B. Sepe, C.M. Morrison, J.M. Miller et A.R. Gale, "High efficiency operation of a hybrid electric vehicle starter/generator over road profiles," dans recueil de *2001 IEEE Industry Applications Conference, 2001, Thirty-Sixth IAS Annual Meeting*, Vol. 2, Septembre/Octobre 2001, pages 921–925.
- [3] H.M. Ryu, S.J. Kim, S.K. Sul, T.S. Kwon, K.S. Kim, Y.S. Shim et K.R. Seok, "Dynamic load simulator for high-speed elevator system," dans recueil de *Power Conversion Conference, 2002. PCC Osaka 2002*, Vol. 2, 2-5 Avril 2002, pages 885–889.
- [4] C.R. Hewson, G.M. Asher et M. Sumner, "Dynamometer control for emulation of mechanical loads," dans recueil de *1998 IEEE Industry Applications Conference, 1998, Thirty-Third IAS Annual Meeting*, Vol. 2, 12-15 Octobre 1998, pages 1511–1518.
- [5] Z.H Akpolat, G.M. Asher et J.C. Clare, " Dynamic emulation of mechanical loads using a vector-controlled induction motor-generator set," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 46 Issue: 2, Avril 1999, pages 370–379.
- [6] The Mathwoks Inc., "Power System Blockset for Use with SIMULINK, User's Guide Version 2.1," Natick, MA, Septembre 2000.

- [7] A. Ba-Razzouk, K. Debebe, A. Pittet et V. Rajagopalan, "SIMUPELS: Simulation of Power Electronic Systems in SIMULINKTM Environment, Version 2.0," Rapport de recherche, Groupe de recherche en électronique industrielle, Université du Québec à Trois-Rivières, 1994, 180 pages.
- [8] R. Chauprade, "Commande électronique des moteurs à courant continu," Éditions Eyrolles, Paris, 1975.
- [9] J. Restrepo, M.I. Gimenez, V.M. Guzman, J.M. Aller, A. Bueno et A. Millan, " Platform III: A new version for the integrated test system for AC machine drives performance analysis," dans recueil de *Fourth IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems, 2002*, 17-19 Avril 2002, pages I036–1–I036-6.
- [10] J. Soltani, B. Szabados et G. Hoolboom, "A New Synthetic Loading for Large Induction Machines With no Feedback into the Power System," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.17, No. 3, Septembre 2002, pages 319–324.
- [11] G.C. Goodwin et K.S. Sin, " Adaptive filtering, prediction and control," Prentice-Hall, Information and system sciences series, 1984.
- [12] P. Sicard, A.Jacob et Y.Dubé, " Notes de cours GEI-6026," UQTR, 1995.
- [13] H. Baibanou, P. Sicard et A. Ba-Razzouk, "Solutions to Typical Motor Load Emulation Control Problems, " dans recueil de *7th International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems, ELECTRIMACS 2002, Montréal, Canada*, Août 2002, CD-ROM.

ANNEXES

Annexe A: Schémas et programmes de simulation des modèles linéaires dans les cas rigide et flexible dans l'environnement Matlab[®] et Simulink[™].

Annexe B: Schémas et programmes de simulation des modèles non linéaires dans le cas rigide et flexible sur PSB.

Annexe C: Schémas et programmes de simulation du système Rigide-Rigide (RR) sur Simulink[™], Matlab[®] et PSB.

Annexe D: Schémas et programmes de simulation du système Flexible-Rigide (FR) sur Simulink[™], Matlab[®] et PSB.

Annexe E: Schémas et programmes de simulation du système Rigide-Flexible (RF) sur Simulink[™], Matlab[®] et PSB.

Annexe F: Schémas et programmes de simulation du système Flexible-Flexible (FF) sur Simulink[™], Matlab[®] et PSB.

Annexe A : Schémas et programmes de simulation des modèles linéaires dans les cas rigide et flexible dans l'environnement Matlab[®] et SimulinkTM

A.1- Modèle linéaire dans le cas rigide :

Les équations mécaniques du système physique avec couplage rigide sur Simulink, sont modélisées dans le bloc DEE, de la figure A.1.

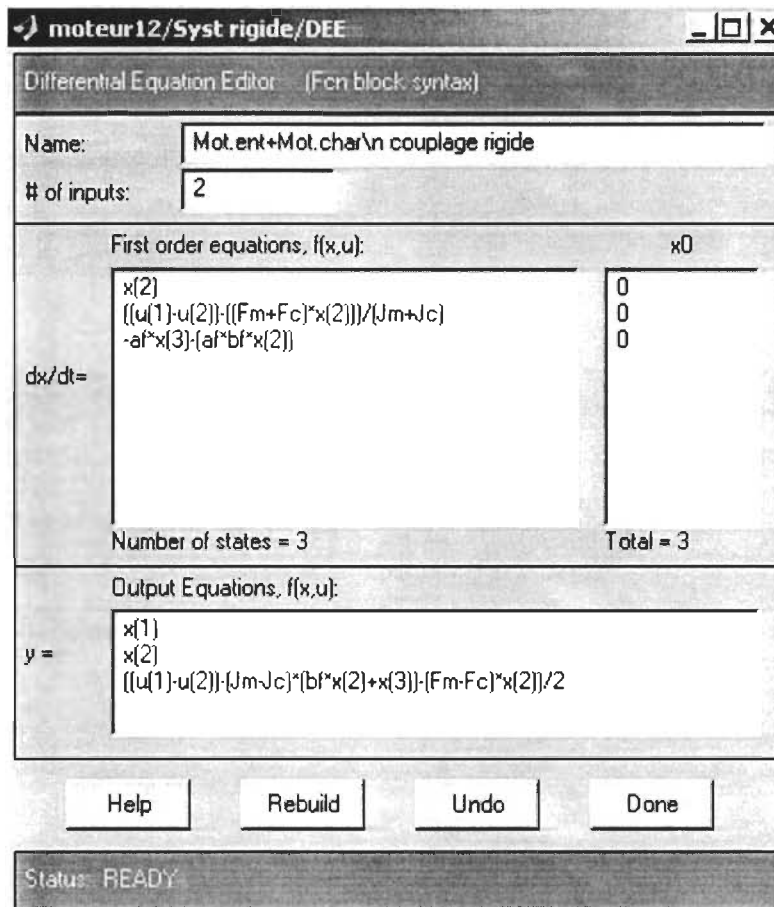


Fig.A.1 : Modèle de système rigide dans le bloc DEE

Le régulateur de vitesse PI avec préfiltre est schématisé comme suit :

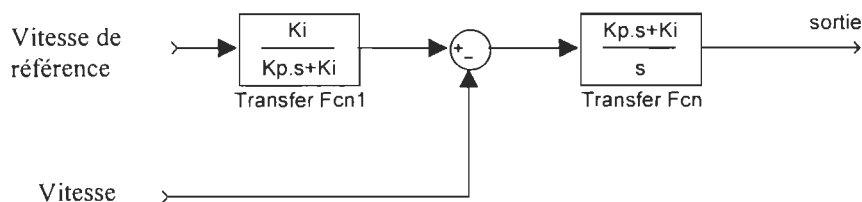


Fig.A.2 : Régulateur de vitesse PI

Le schéma de contrôleur PI a été modifié et devient comme suit :

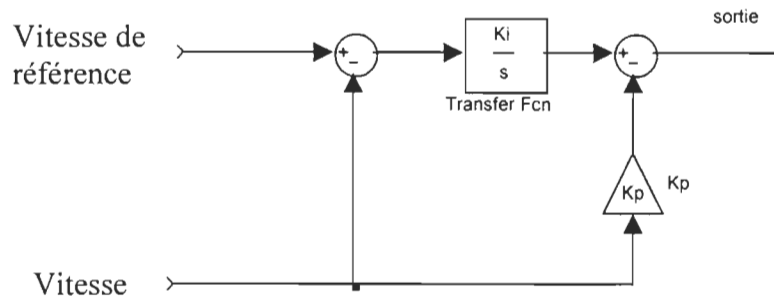


Fig.A.3 : Modèle de régulateur modifié

Le régulateur de vitesse PI présenté à la figure 3.4, est illustré à la figure A.4.

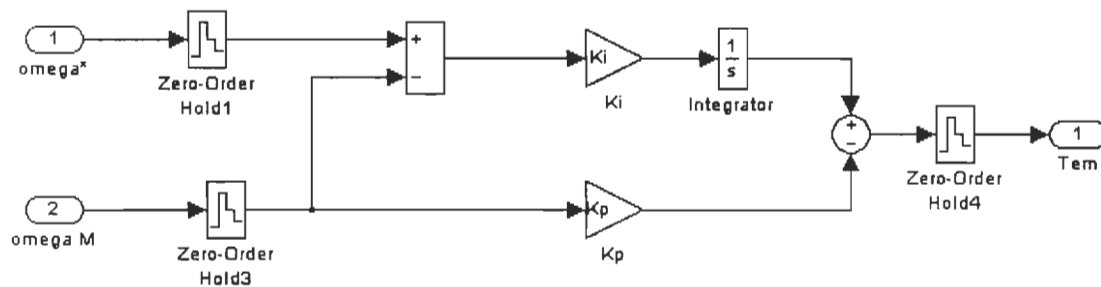


Fig.A.4 : Modèle de régulateur de vitesse PI dans Simulink

A.2- Modèle linéaire dans le cas flexible :

Les équations mécaniques du système physique avec couplage flexible sur Simulink, sont modélisées dans le bloc DEE présenté à la figure A.5.

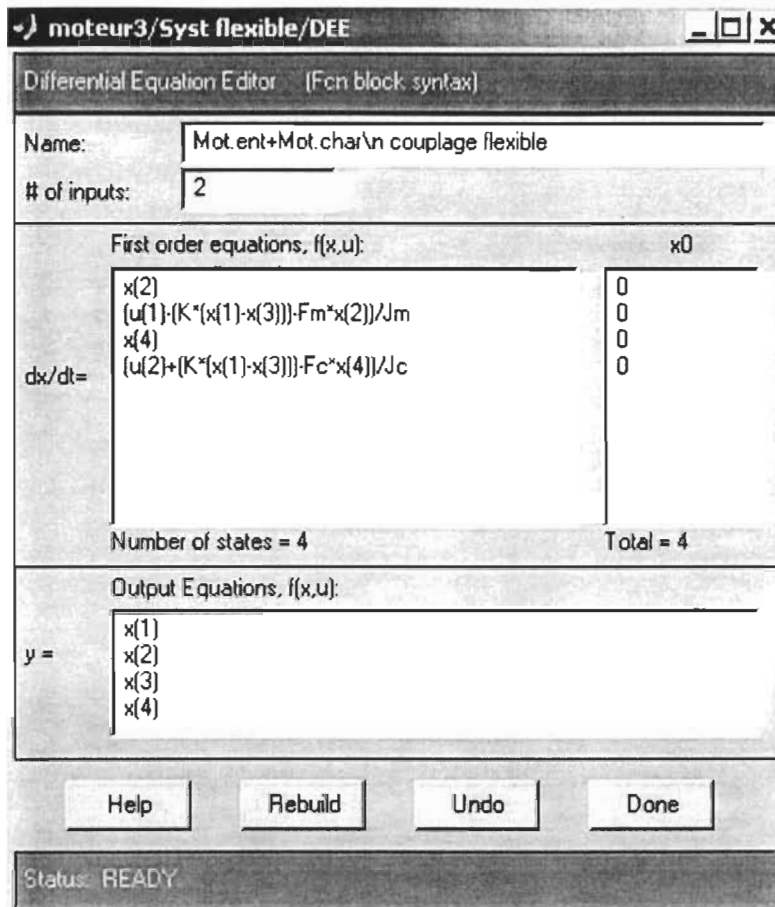


Fig.A.5 : Modèle de système flexible dans le bloc DEE

A.3- Utilisation des modèles linéaires :

La vitesse de consigne utilisée pour la simulation des modèles linéaires et non-linéaires, est représentée à la figure 3.11.

- **Cas rigide :**

Les paramètres des machines pour le couplage rigide dans l'environnement MATLAB, concernant les modèles linéaire et non-linéaire sont définis comme suit:

```
% les paramètres du moteur d'entraînement et de la charge pour un couplage rigide %
clear all
% la vitesse présente la vitesse de consigne du système
load vitesse
```



```
%temps d'échantillonnage
Tech = 1e-4;
%l'inertie et frottement de la charge
Jc=0.0357;
Fc=0.003;
%l'inertie et frottement du moteur d'entraînement
Jm= Jc*3;
Fm= Fc*4;
%l'inertie et frottement de la charge désire
Jc1=Jc*5;
Fc1=Fc*3;
%l'inertie et frottement total
Jt1=Jm+Jc1;
Ft1=Fm+Fc1;
% les coefficients du filtre dérivatif
af =3000;
bf = af;
% les pulsations de coupure du système
w1=80;
w2=200;
% les coefficients du gain de contrôleur PI
Kp=(w1+w2)*Jt1-Ft1;
Ki=w1*w2*Jt1;
% simulation du système physique avec couplage rigide
sim('moteur1')
%l'erreur entre la vitesse du moteur d'entraînement et la vitesse de consigne
e=omega-wref;
figure ;
plot(t,omega,t,wref);
figure;
plot(t,e);
```

- **Cas flexible :**

Les paramètres des machines pour le couplage flexible dans l'environnement

MATLAB concernant les modèles linéaire et non-linéaire sont définis comme suit:

```
% les paramètres du moteur d'entraînement et de la charge pour un couplage flexible %
clear all
% la vitesse présente la vitesse de consigne du système
load vitesse
% le temps d'échantillonnage
Tech=1e-4;
% le coefficient du ressort de torsion
k=500;
```

```

%l'inertie et frottement de la charge
Jc=0.0357;
Fc=0.003;
%l'inertie et frottement du moteur d'entraînement
Jm= Jc*3;
Fm =Fc*4;
%l'inertie et frottement de la charge désire
Jc1=Jc*5;
Fc1=Fc*3;
%l'inertie et frottement total
Jt1=Jm+Jc1;
Ft1=Fm+Fc1;
% les pulsations de coupure du système
w1=80;
w2=200;
% le calcul des gains du contrôleur PI
Kp=(w1+w2)*Jt1-Ft1;
Ki=w1*w2*Jt1;
% simulation du système physique avec couplage rigide
sim('moteur2')
%l'erreur entre la vitesse du moteur d'entraînement et la vitesse de consigne
e=omega-wref;
figure ;
plot(t,omega,t,wref);
figure;
plot(t,e);

```

*Annexe B: Schémas et programmes de simulation des
modèles non linéaires dans les cas rigide et flexible sur
PSB*

B.1- Paramètres de la machine sous test et la charge:

Les paramètres d'une machine de 3hp avec 120v-208v :

$$R_s=0.6\Omega;$$

$$R_r=0.4\Omega;$$

$$L_s=0.0727H;$$

$$L_r=0.0727H;$$

$$M=0.0698H;$$

$$L_{ls}=L_s-M=2.9mH;$$

$$L_{lr}=L_r-M=2.9mH;$$

$$J=0.0357;$$

$$F_m=0.003;$$

$$P_p=2;$$

$$T_{em_{nom}}=10N.m.$$

B.2- Modèle complet sur PSB dans le cas rigide :

La source dans le système physique présenté à la figure 3.10 est constituée d'une source à courant alternatif avec un redresseur, représentés comme suit :

Tel que les paramètres de l'inductance $L1$ et la capacitance C de la figure B.1 sont :

$$L_1 = 0.2 \text{ mH};$$

$$C = 1650 \text{ } \mu\text{F}.$$

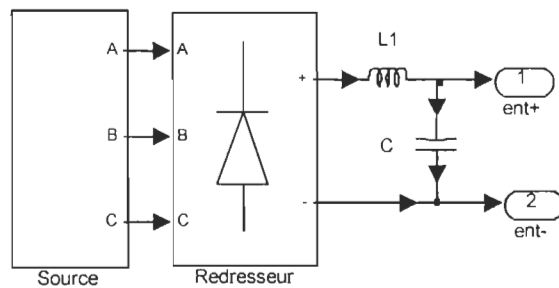


Fig.B.1 : Source de courant avec redresseur

Tel que les paramètres de l'inductance L et la résistance R de la figure B.2 sont :

$$L = 1 \text{ mH};$$

$$R = 0.01 \Omega .$$

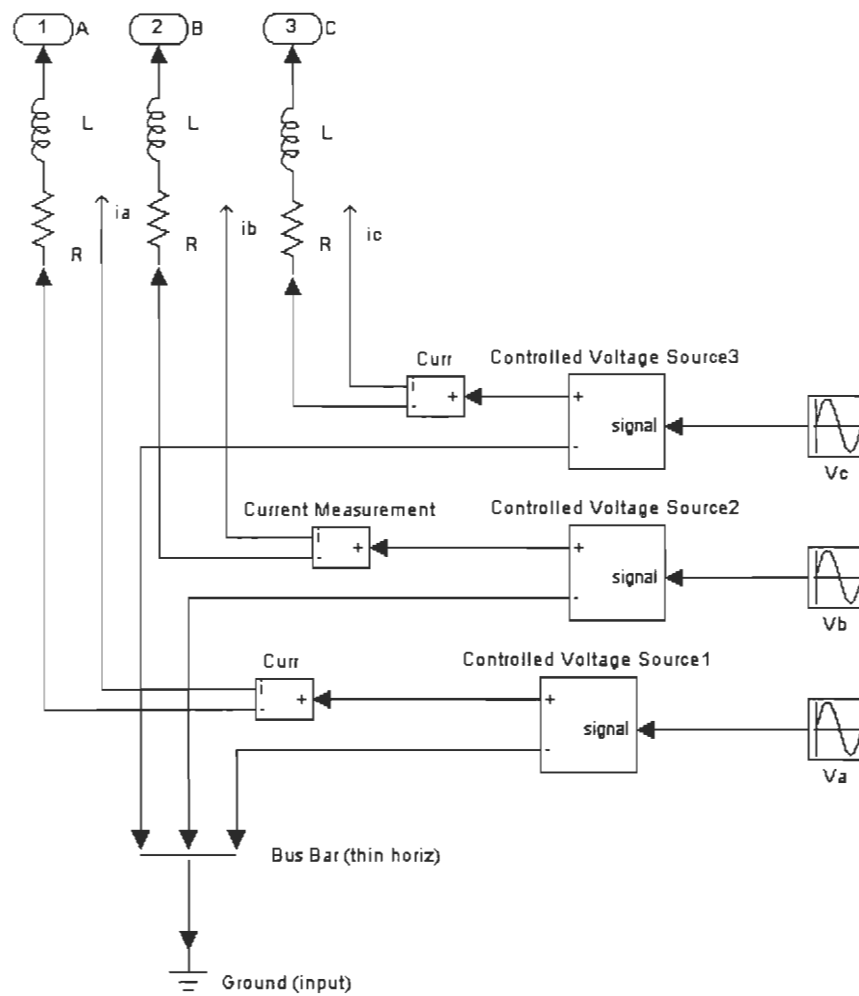


Fig.B.2 : Source de courant alternatif

Le régulateur à orientation de flux dans le moteur d'entraînement présenté à la figure 3.8, est illustré à la figure B.3.

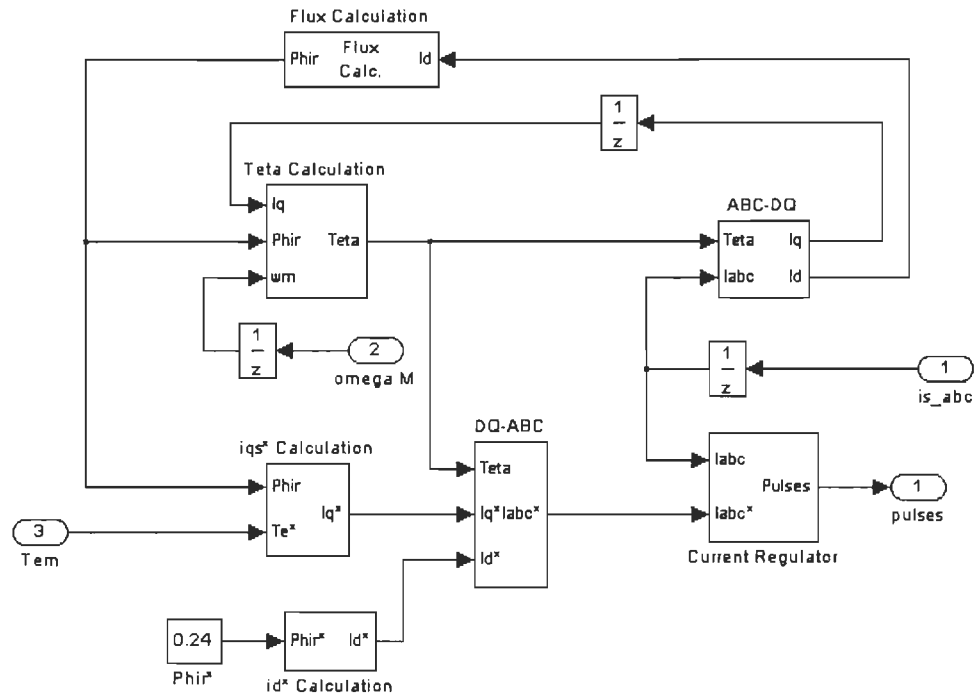


Fig.B.3 : Orientation de flux dans PSB

La charge est représentée dans le système SIMUPELS comme illustré sur la figure B.4. Les paramètres mécaniques de la charge (inertie et frottement) sont inclus dans le modèle du moteur d'entraînement et exclus du modèle du moteur de charge. Le modèle du moteur de la charge est donc un modèle purement électromagnétique.

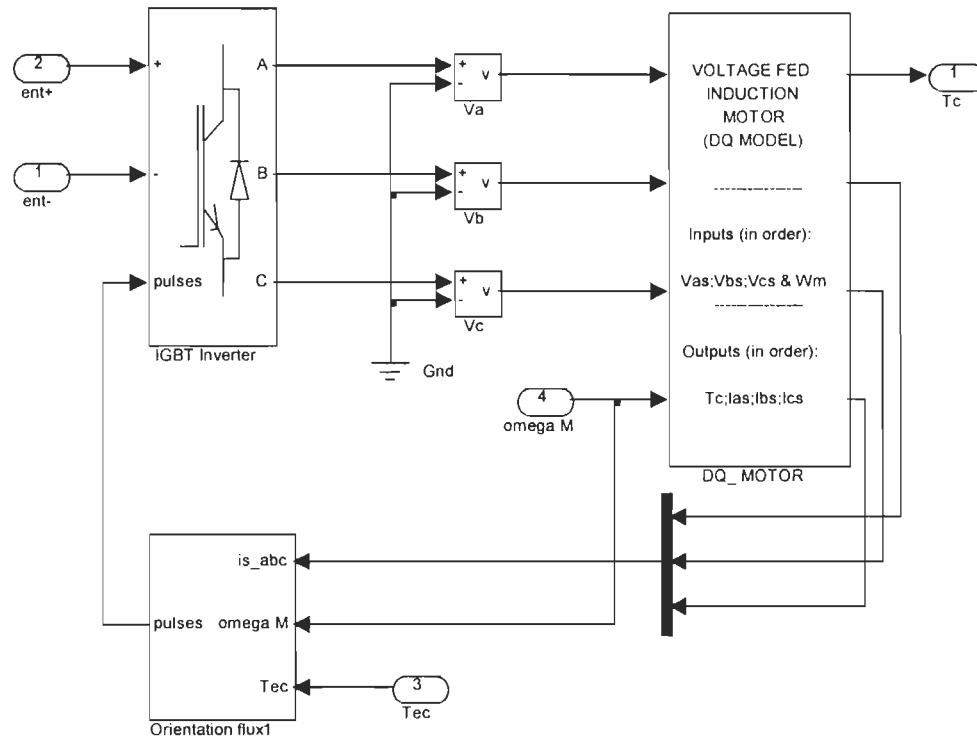


Fig.B.4 : Modèle de la charge

Le moteur DQ dans le modèle SIMUPELS est illustré à la figure B.5. Le régulateur à orientation de flux est le même que celui du moteur d'entraînement.

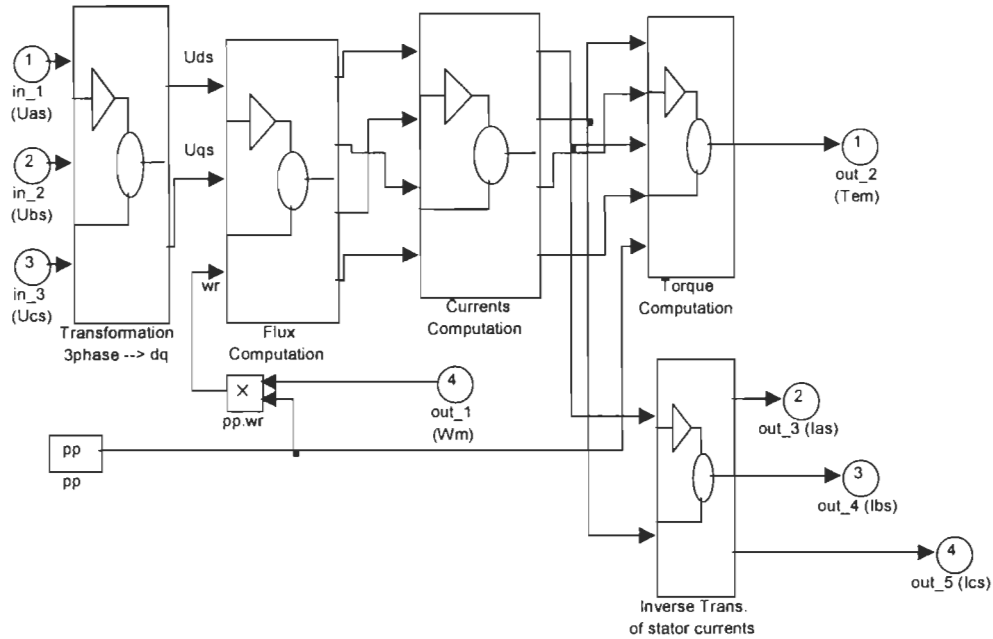


Fig.B.5 : Modèle du moteur DQ dans SIMUPELS

Le régulateur de vitesse du moteur d'entraînement présenté à la figure 3.10 reste identique au cas rigide avec modèle linéaire de la figure A.4.

B.3- Modèle complet sur PSB dans le cas flexible:

Le système physique avec couplage flexible est présenté à la figure 3.9. Le schéma de la source et le régulateur de vitesse du moteur d'entraînement se présentent de la même façon que dans le cas rigide (figures B.1, B.2, A.4). La charge est représentée de la même façon que le moteur d'entraînement dans PSB (figure 3.8).

Annexe C: Schémas et programmes de simulation du système rigide-rigide (RR) sur SimulinkTM, Matlab[®] et PSB.

C.1- Modèles linéaires pour le système RR:

Le schéma général du système RR utilisant les modèles linéaires est illustré à la figure 4.2 du chapitre IV.

L'émulateur de charge dans le modèle SIMULINK est défini comme suit :

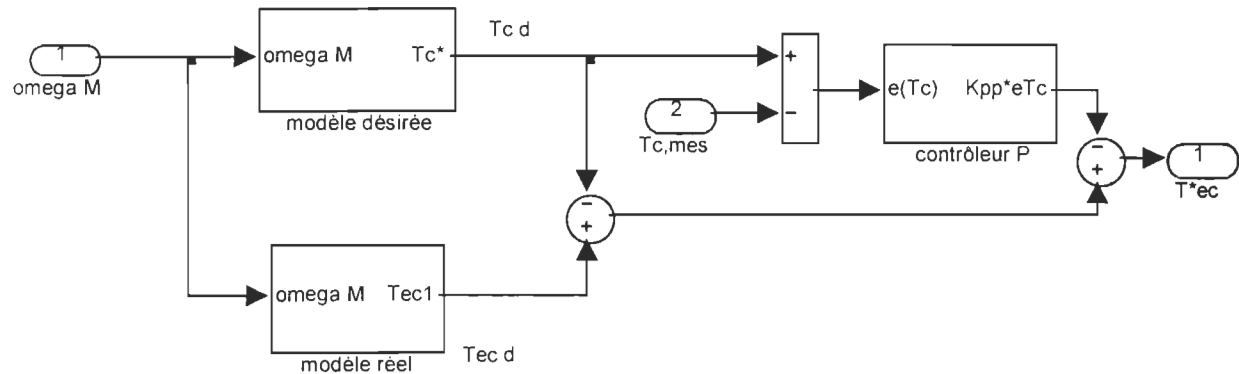


Fig.C.1 : Émulateur de charge du système RR, modèle linéaire

Le modèle désiré de la figure C.1 est montré à la figure C.2:

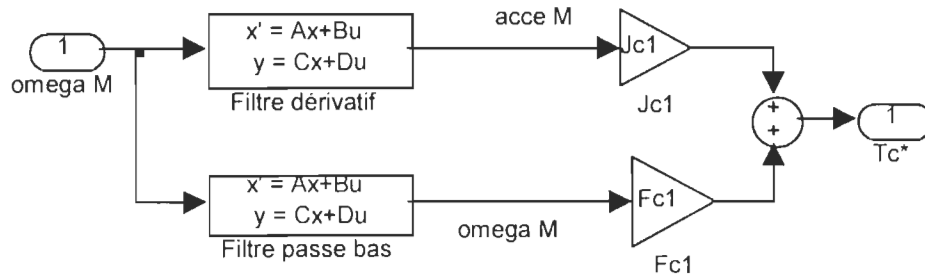


Fig.C.2 : Schéma du modèle désiré de l'émulateur de système RR

Le modèle réel de la figure C.1 est présenté comme suit :

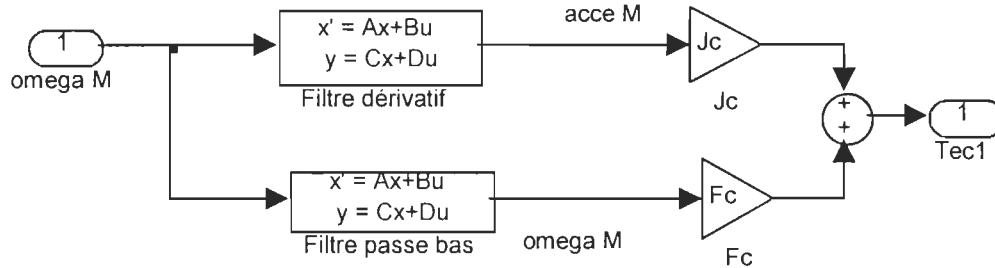


Fig.C.3 : Schéma du modèle réel de l'émulateur de système RR

Le filtre dérivatif dans les figure C.2 et C.3 est présenté comme suit :

Block Parameters: Filtre dérivatif x

State Space

State-space model:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

Parameters

A:

B:

C:

D:

Initial conditions:

Absolute tolerance:

OK
Cancel
Help
Apply

Fig.C.4 : Schéma du filtre dérivatif

Le filtre passe bas dans les figure C.2 et C.3 est présenté comme suit :

Block Parameters: Filtre passe bas

State Space

State-space model:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

Parameters

A:

B:

C:

D:

Initial conditions:

Absolute tolerance:

OK Cancel Help Apply

Fig.C.5 : Schéma du filtre passe bas

Le contrôleur proportionnel de la figure C.1 est représenté comme suit :

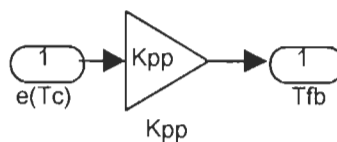


Fig.C.6 : Schéma du contrôleur proportionnel de l'émulateur de système RR

Le système avec couplage rigide sans émulateur et avec les caractéristiques du modèle désiré est illustré à la figure 4.2 du chapitre IV. Les paramètres du moteur d'entraînement et de la charge sont comme suit :

Block Parameters: Syst rigide [X]

Subsystem (mask) _____

Parameters

Constante , af= _____
af

Constante , bf= _____
bf

Inertie de charge, Jc= _____
Jc

Frottement de charge, Fc= _____
Fc

Inertie du moteur, Jm= _____
Jm

Frottement du moteur, Fm= _____
Fm

OK Cancel Help Apply

Fig.C.7 : Paramètres du moteur d'entraînement et de la charge désirée, modèle linéaire RR

Programme MATLAB, modèle linéaire :

```
% les paramètre d'un système RR, pour le modèle linéaire %
clear all
load vitesse
%temps d'échantillonnage
Tech = 1e-4;
%l'inertie de la charge
Jc=0.0357;
%l'inertie du moteur d'entraînement
Jm=Jc*3;
%l'inertie de la charge désirée
Jc1=Jc*5;
% frottement de la charge
Fc=0.003;
%frottement du moteur d'entraînement
Fm=Fc*4;
%frottement de la charge désirée
Fc1=Fc*3;
%l'inertie et frottement total
Jt1=Jm+Jc1;
```

```

Ft1=Fm+Fc1;
%les coefficients du filtre dérivatif
af=3000;
bf=af;
% les pulsations de coupure du système
w1=20;
w2=40;
% les coefficients du gain de contrôleur PI
Kp=(w1+w2)*Jt1-Ft1;
Ki=w1*w2*Jt1;
%le coefficient du gain de contrôleur P
Kpp=3;
% simulation du système RR
sim('moteur11')      % Tem,omega
sim('moteur111')     % Tem1,omega1
%l'erreur du couple électromagnétique du moteur d'entraînement
e=Tem-Tem1;
equa=norm(e)
figure;
plot(t,e);
figure;
plot(t,Tem,t,Tem1);
%l'erreur de la vitesse du moteur d'entraînement
e1=omega-omega1;
equa=norm(e1)
figure;
plot(t,e1);

```

Résultats de simulation :

La figure C.8 présente l'erreur de la vitesse du moteur d'entraînement entre le système RR et le système physique sans émulateur avec les caractéristiques de la charge désirée en utilisant les modèles linéaires.

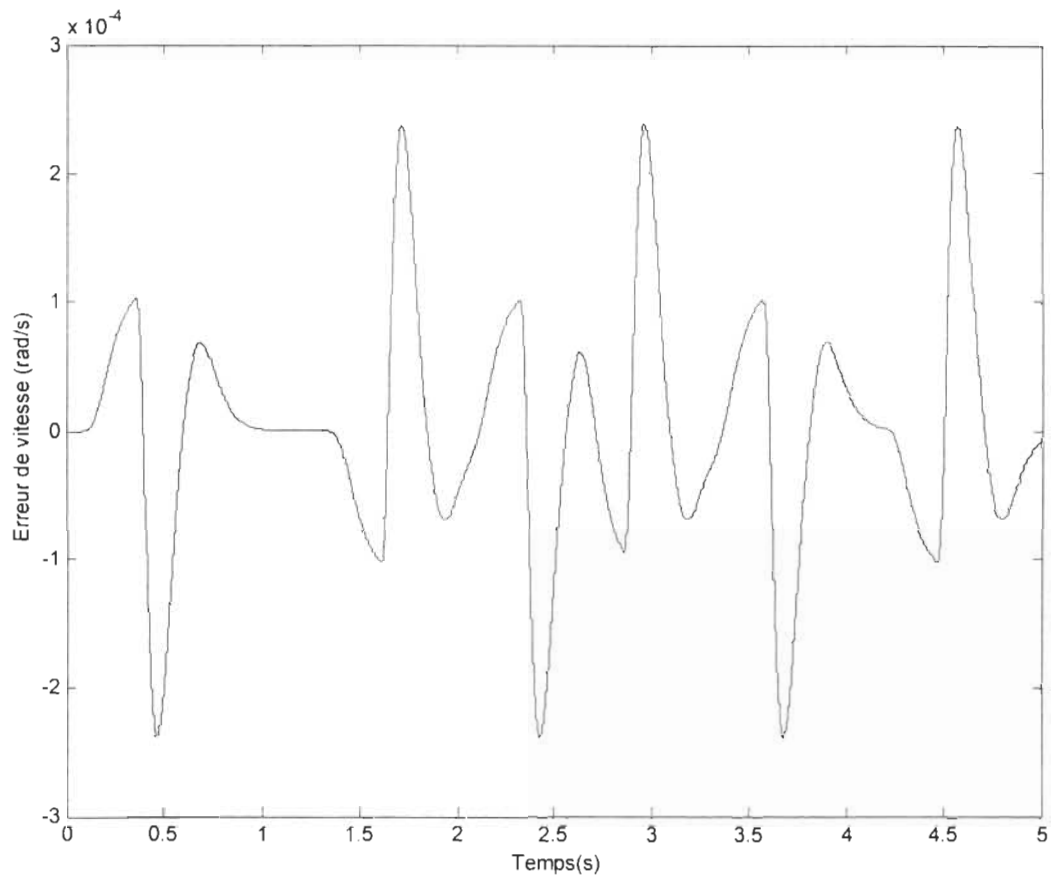


Fig.C.8 : Erreur de vitesse du moteur d'entraînement, modèle linéaire RR

C.2- Modèle complet sur PSB pour le système RR:

Le schéma général du système RR utilisant les modèles non-linéaires, est illustré à la figure 5.2 du chapitre V.

L'émulateur de charge du système RR, sous PSB est illustré à la figure 5.1 du chapitre V, ainsi que le modèle désiré. Le modèle réelle et le contrôleur proportionnel sont présentés aux figures C.2, C.3 et C.6 respectivement. Le calcul du couple mécanique mesuré est présenté à la figure C.9.

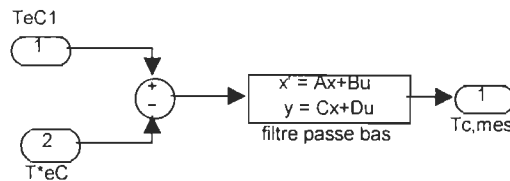


Fig.C.9 : Schéma du calcul de couple mécanique mesuré, modèle PSB

Le filtre passe bas est représenté dans la figure C.5.

Dans le schéma général du système RR, nous avons utilisé le modèle du moteur d'entraînement avec un bloc PSB tel que présenté à la figure 3.8. Le modèle du moteur de la charge utilise un modèle de SIMUPELS de la machine asynchrone et il est présenté à la figure B.4.

Les paramètres mécaniques de la charge sont inclus dans le modèle du moteur d'entraînement et exclus du modèle du moteur de charge tel que nous montre la figure C.10 :

Block Parameters: moteur

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor or squirrel cage) modeled in the dq rotor reference frame. Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point. Press help for inputs and outputs description.

Parameters

Rotor type:

Reference frame:

Nom. power, L-L volt. and freq. [Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz)]:

Stator [Rs(ohm) Lls(H)]:

Rotor [Rr'(ohm) Llr'(H)]:

Mutual inductance Lm (H):

Inertia, friction factor and pairs of poles [J(kg.m^2) F(N.m.s) p()]:

Initial conditions [s() th(deg) isa, isb, isc(A) pha, phb, phc(deg)]:

OK Cancel Help Apply

Fig.C.10 : Paramètres du moteur d'entraînement et celui de la charge dans le bloc PSB

Le système avec couplage rigide sans émulateur et avec les caractéristiques du modèle désiré est illustré à la figure 5.3 du chapitre V, les paramètres du moteur d'entraînement et de la charge sont présentés à la figure C.11 comme suit :

Block Parameters: moteur

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor or squirrel cage) modeled in the dq rotor reference frame. Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point. Press help for inputs and outputs description.

Parameters:

Rotor type:

Reference frame:

Nom. power, L-L volt. and freq. [Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz)]:

Stator [Rs(ohm) Lls(H)]:

Rotor [Rr(ohm) Llr(H)]:

Mutual inductance Lm (H):

Inertia, friction factor and pairs of poles [J(kg.m^2) F(N.m.s) p()]:

Initial conditions [s() th(deg) isa, isb, isc(A) pha, phb, phc(deg)]:

OK Cancel Help Apply

Fig.C.11 : Paramètres du moteur d'entraînement et de la charge désirée, modèle PSB

La vitesse de consigne est représentée à la figure 3.11.

Programme MATLAB, modèle non-linéaire

```
% les paramètres d'un système RR, pour le modèle non-linéaire %
clear all
%temps d'échantillonnage
Tech=1e-6;
Ts=Tech;
%l'inertie de la charge
Jc=0.0357;
%l'inertie du moteur d'entraînement
Jm=Jc*3;
%l'inertie de la charge désirée
Jcl=Jc*5;
```

```
% frottement de la charge
Fc=0.003;
%frottement du moteur d'entraînement
Fm=Fc*4;
%frottement de la charge désirée
Fc1=Fc*3;
%l'inertie et frottement total
Jt=Jm+Jc;
Ft=Fm+Fc;
%l'inertie et frottement du moteur d'entraînement et la charge désirée
Jt1=Jm+Jc1;
Ft1=Fm+Fc1;
% les pulsations de coupure du système
w1=20;
w2=40;
% les coefficients du gain de contrôleur PI
Kp=(w1+w2)*Jt1-Ft1;
Ki=w1*w2*Jt1;
%les coefficients du filtre dérivatif
af=3000;
bf=af;
%le coefficient du gain de contrôleur P
Kpp=3;
% simulation du système RR
sim('moteur1')      % Tem, omega
sim('moteur2')      % Tem1, omega1
%l'erreur du couple électromagnétique du moteur d'entraînement
e=Tem-Tem1;
equa=norm(e)
figure;
plot(t,e);
figure;
plot(t,Tem,t,Tem1,'r');
%l'erreur de la vitesse du moteur d'entraînement
e1=omega-omega1;
equa=norm(e1)
figure;
plot(t,e1);
figure;
plot(t,omega,t,omega1,'r')
```

Résultats de simulation :

L'erreur de la vitesse du moteur d'entraînement, entre le système RR et le système physique sans émulateur et avec caractéristiques de la charge désirée sous PSB et SIMUPELS, est présentée à la figure C.12.

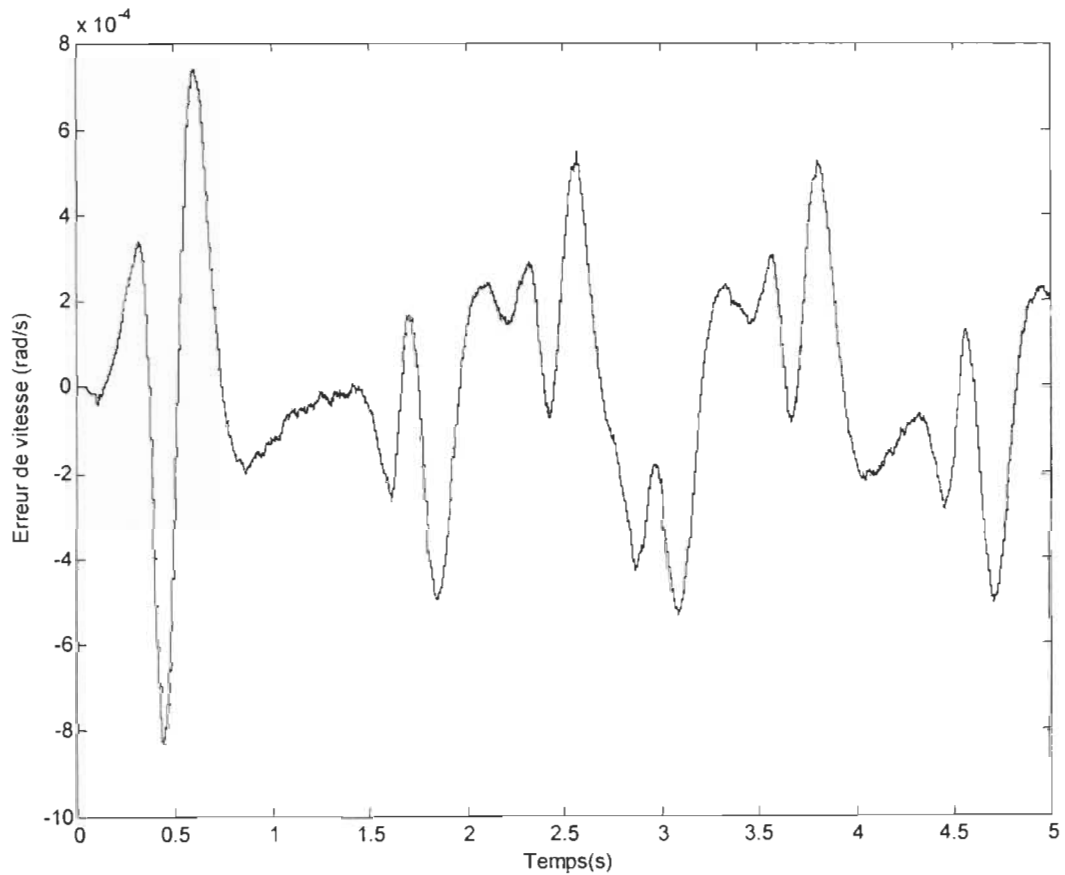


Fig.C.12 : Erreur de vitesse du moteur d'entraînement, modèle PSB(RR)

Annexe D: Schémas et programmes de simulation du système Flexible-Rigide (FR) sur SimulinkTM, Matlab[®] et PSB.

D.1- Modèles linéaires pour le système FR:

Le schéma général du système FR utilisant les modèles linéaires, est illustré à la figure 4.6 du chapitre IV.

L'émulateur de charge du système FR est présenté à la figure 4.6 du chapitre IV.

Le modèle désiré présenté dans l'émulateur de charge de la figure 4.6 est illustré comme suit :

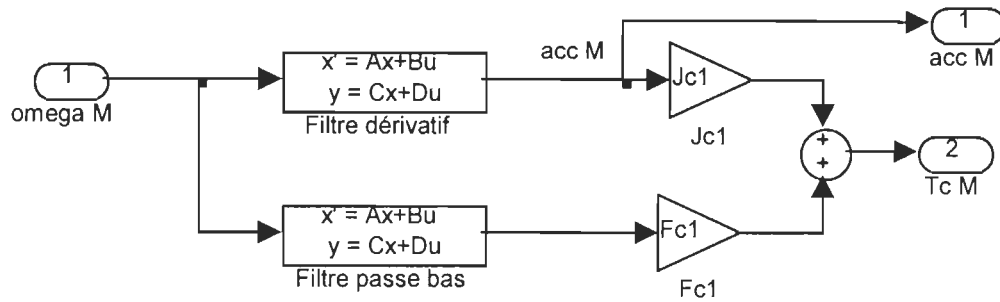


Fig.D.1 : Schéma du modèle désiré de l'émulateur de système FR

Le modèle réel présenté dans l'émulateur de charge à la figure 4.6 est illustré comme suit :

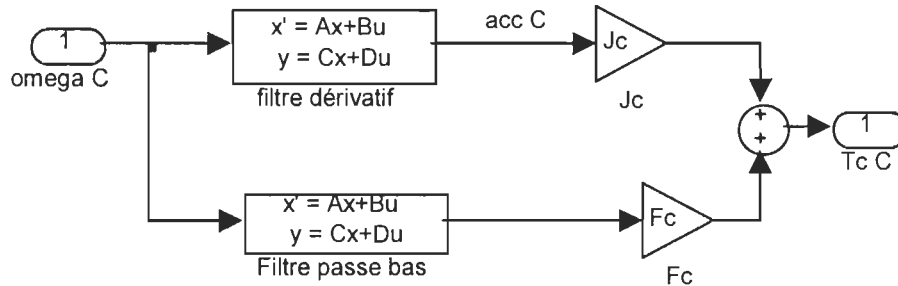


Fig.D.2 : Schéma du modèle actuel de l'émulateur de système FR

Le filtre dérivatif dans les figure D.1 et D.2 est le même filtre présenté dans la figure C.4.

Le filtre passe bas dans les figure D.1 et D.2 est le même filtre présenté dans la figure C.5.

Le contrôleur PD est représenté comme suit :

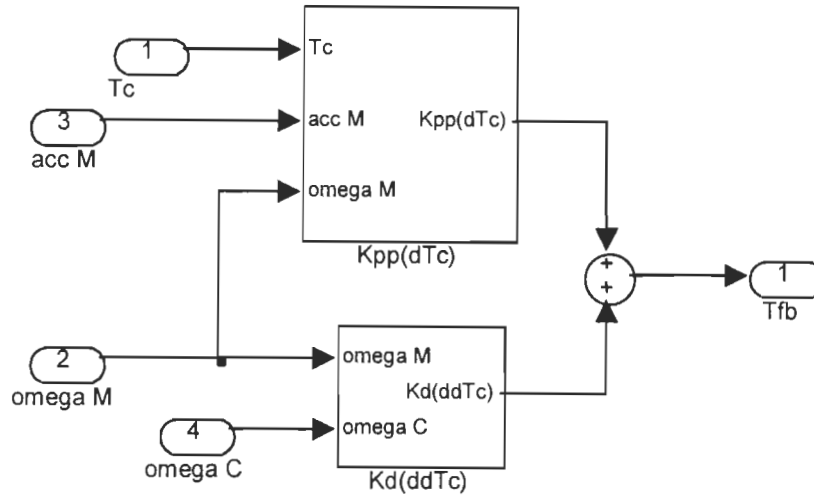


Fig.D.3 : Schéma du contrôleur PD de l'émulateur de système FR

Le bloc $K_{pp} \Delta T_{ec}$ du contrôleur PD est présenté comme suit :

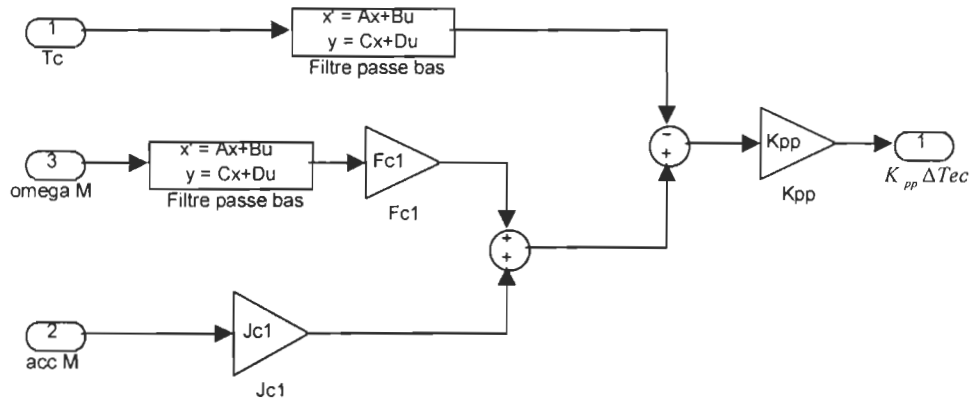


Fig.D.4 : Schéma du contrôleur proportionnel de l'émulateur de système FR

Le bloc $K_d \frac{d\Delta T_{ec}}{dt}$ du contrôleur PD est présenté comme suit :

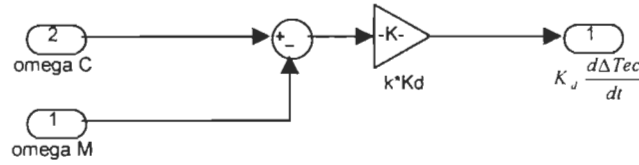


Fig.D.5 : Schéma du contrôleur dérivateur de l'émulateur de système FR

Le système avec couplage rigide sans émulateur et avec les caractéristiques du modèle désiré est illustré à la figure 4.3 du chapitre IV, les paramètres du moteur d'entraînement et de la charge sont présentés à la figure C.5.

Programme MATLAB, modèle linéaire :

```
% les paramètre d'un système FR, pour le modèle linéaire %
clear all
load vitesse
%temps d'échantionnage
Tech=1e-4;
% le coefficient du ressort du torsion
k=500;
%l'inertie de la charge
Jc=0.0357;
%l'inertie du moteur d'entraînement
Jm=Jc*3;
%l'inertie de la charge désirée
Jc1=Jc*5;
% frottement de la charge
Fc=0.003;
%frottement du moteur d'entraînement
Fm=Fc*4;
%frottement de la charge désirée
Fc1=Fc*3;
%l'inertie et frottement total
Jt1=Jm+Jc1;
Ft1=Fm+Fc1;
% les pulsations de coupure du système
w1=20;
w2=40;
% les coefficients du gain de contrôleur PI
```

```

Kp=(w1+w2)*Jt1-Ft1;
Ki=w1*w2*Jt1;
%les coefficients du filtre dérivatif
af=3000;
bf=af;
af1=af;
bf1=af;
%les coefficients du gain du contrôleur PD
Kpp=9;
Kd=0.05;
% simulation du système RF
sim('moteur11')
sim('moteur14')
%l'erreur du couple électromagnétique du moteur d'entraînement
e=Tem-Tem1;
equa=norm(e)
figure;
plot(t,e);
figure;
plot(t,Tem,t,Tem1);
%l'erreur de la vitesse du moteur d'entraînement
e1=omega-omegal;
equa=norm(e1)
plot(t,e1);

```

Résultats de simulation :

La figure D.6 présente l'erreur de la vitesse du moteur d'entraînement entre le système FR et le système physique sans émulateur avec les caractéristiques de la charge désirée en utilisant les modèles linéaires.

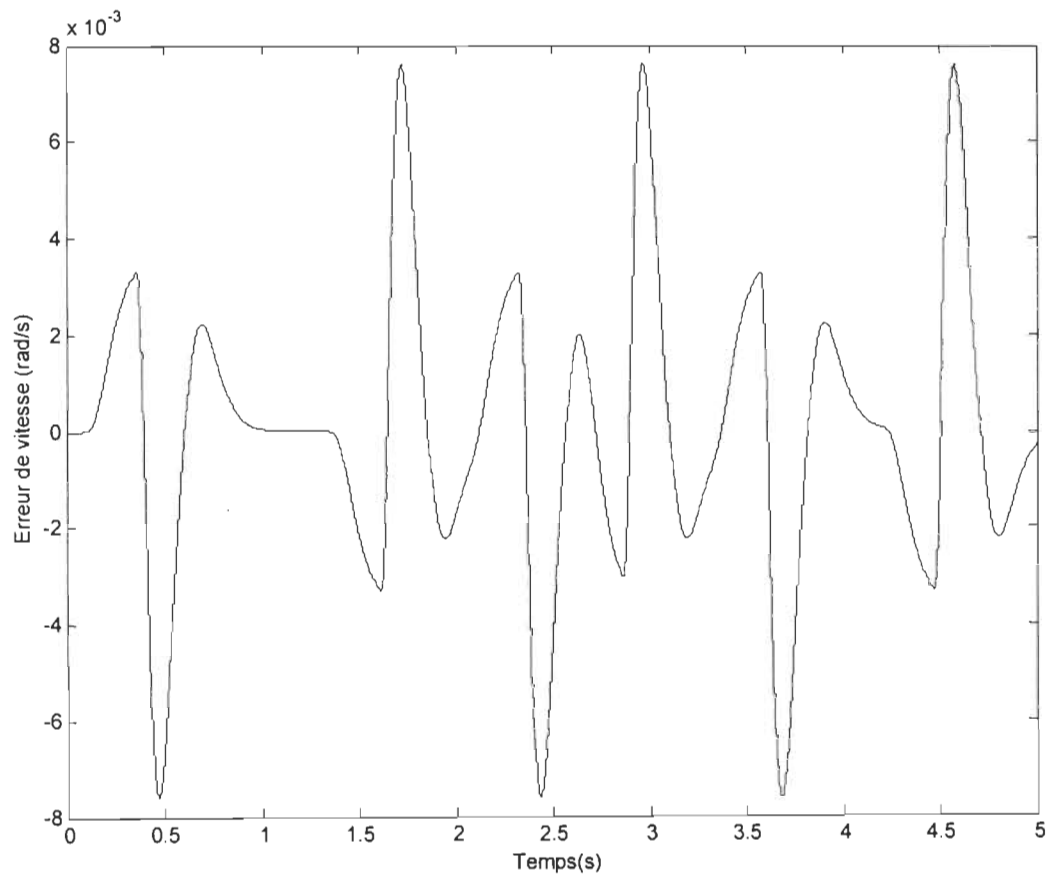


Fig.D.6 : Erreur de vitesse du moteur d'entraînement, modèle linéaire FR

D.2- Modèles complets sur PSB pour le système FR:

Le schéma général du système FR utilisant les modèles non-linéaires, est illustré à la figure 5.6 du chapitre V.

L'émulateur de charge du système FR, sous PSB est illustré à la figure 4.6 du chapitre IV, ainsi que le modèle désiré. Le modèle actuel et le contrôleur PD sont présentés aux figures D.1, D.2, D.3, D.4 et D.5 respectivement. Le couple mécanique mesuré est calculé à partir de l'équation (4.14).

Dans le schéma général du système FR, nous avons utilisé le modèle du moteur d'entraînement et de la charge dans PSB, tel que présenté à la figure 3.8.

La vitesse de consigne est représentée à la figure 3.11.

Programme MATLAB, modèle non-linéaire

```
% les paramètres d'un système FR, pour le modèle non-linéaire %
clear all
%temps d'échantillonnage
Tech=1e-6;
Ts=Tech;
% le coefficient du ressort du torsion
k=500;
%l'inertie de la charge
Jc=0.0357;
%l'inertie du moteur d'entraînement
Jm=Jc*3;
%l'inertie de la charge désirée
Jcl=Jc*5;
% frottement de la charge
Fc=0.003;
%frottement du moteur d'entraînement
Fm=Fc*4;
%frottement de la charge désirée
Fc1=Fc*3;
%l'inertie et frottement total
```

```

Jt=Jm+Jc;
Ft=Fm+Fc;
%l'inertie et frottement du moteur d'entraînement et la charge désirée
Jt1=Jm+Jc1;
Ft1=Fm+Fc1;
% les pulsations de coupure du système
w1=20;
w2=40;
% les coefficients du gain de contrôleur PI
Kp=(w1+w2)*Jt1-Ft1;
Ki=w1*w2*Jt1;
%les coefficients du filtre dérivatif
af=3000;
bf=af;
%les coefficients du gain de contrôleur PD
Kpp=9;
Kd=0.05;
% simulation du système FR
sim('moteur1')
sim('moteur31')
%l'erreur du couple électromagnétique du moteur d'entraînement
e=Tem-Tem1;
equa=norm(e)
figure;
plot(t,e);
figure;
plot(t, Tem,t,Tem1,'r');
%l'erreur de la vitesse du moteur d'entraînement
e1=omega-omegal;
equa=norm(e1)
figure;
plot(t,e1);
figure;
plot(t,omega,t,omegal,'r')

```

Résultats de simulation :

L'erreur de la vitesse du moteur d'entraînement entre le système FR et le système physique sans émulateur et avec les caractéristiques de la charge désirée sous PSB est présentée à la figure D.7.

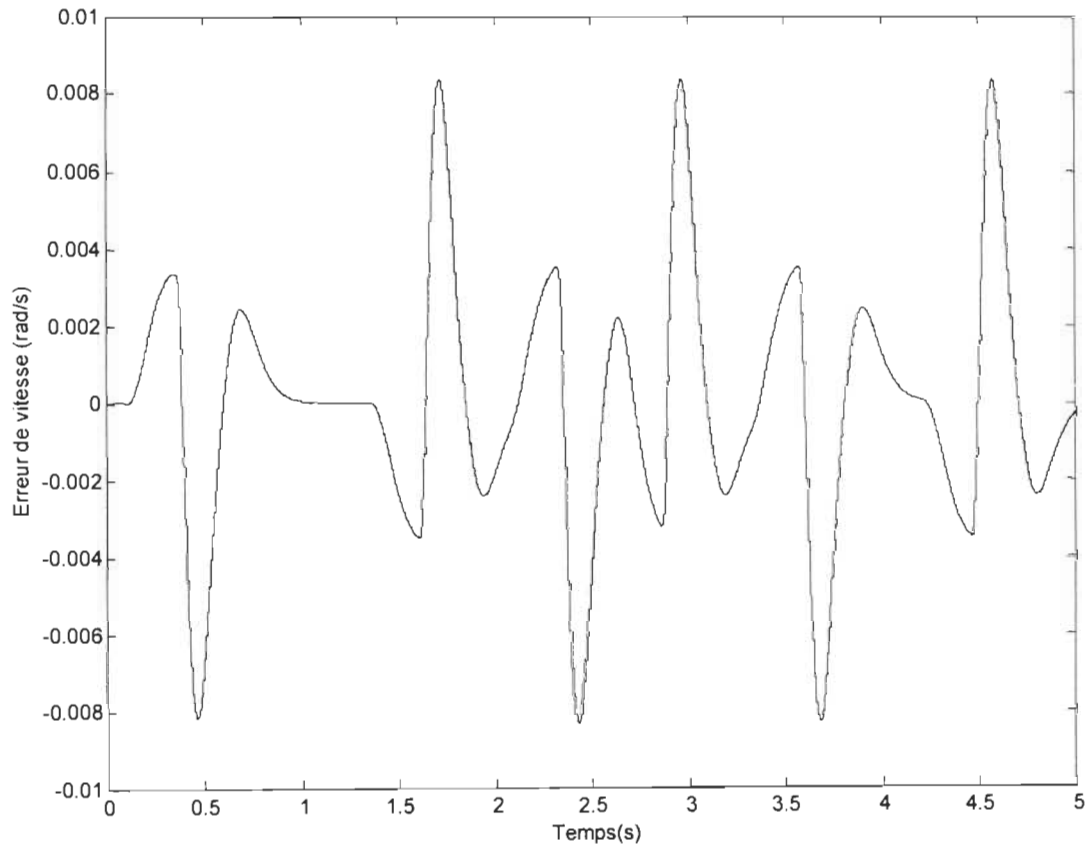


Fig.D.7 : Erreur de vitesse du moteur d'entraînement, modèle PSB(FR)

D.3- Variations des paramètres de la charge pour le système FR:

Programme MATLAB, modèle PSB, avec une diminution de 50% de la charge

```
% les paramètres d'un système FR, le modèle PSB, avec une diminution de 50% de la charge %
clear all
load vitesse
%temps d'échantillonnage
Tech=1e-6;
Ts=Tech;
% le coefficient du ressort du torsion
k=500;
%l'inertie de la charge
Jc=0.0357;
%l'inertie du moteur d'entraînement
Jm=Jc*3;
%l'inertie de la charge désirée
Jc1=Jc*5*0.5;
% frottement de la charge
Fc=0.003;
%frottement du moteur d'entraînement
Fm=Fc*4;
%frottement de la charge désirée
Fc1=Fc*3*0.5;
%l'inertie et frottement total
Jt=Jm+Jc;
Ft=Fm+Fc;
%l'inertie et frottement du moteur d'entraînement et la charge désirée
Jt1=Jm+Jc1;
Ft1=Fm+Fc1;
% les pulsations de coupure du système
w1=20;
w2=40;
% les coefficients du gain de contrôleur PI
Kp=(w1+w2)*Jt1-Ft1;
Ki=w1*w2*Jt1;
%les coefficients du filtre dérivatif
af=3000;
bf=af;
%les coefficients du gain de contrôleur PD
Kpp=9;
Kd=0.05;
% simulation du système FR
sim('moteur1')
sim('moteur31')
```

```
%l'erreur du couple électromagnétique du moteur d'entraînement
e=Tem-Tem1;
equa=norm(e)
figure;
plot(t,e);
figure;
plot(t, Tem,t, Tem1,'r');
%l'erreur de la vitesse du moteur d'entraînement
e1=omega-omegal;
equa=norm(e1)
figure;
plot(t,e1);
figure;
plot(t,omega,t,omegal,'r')
```


Résultats de simulation :

L'erreur de la vitesse du moteur d'entraînement entre le système FR et le système physique sans émulateur et avec les caractéristiques de la charge désirée sous PSB est présentée à la figure D.8.

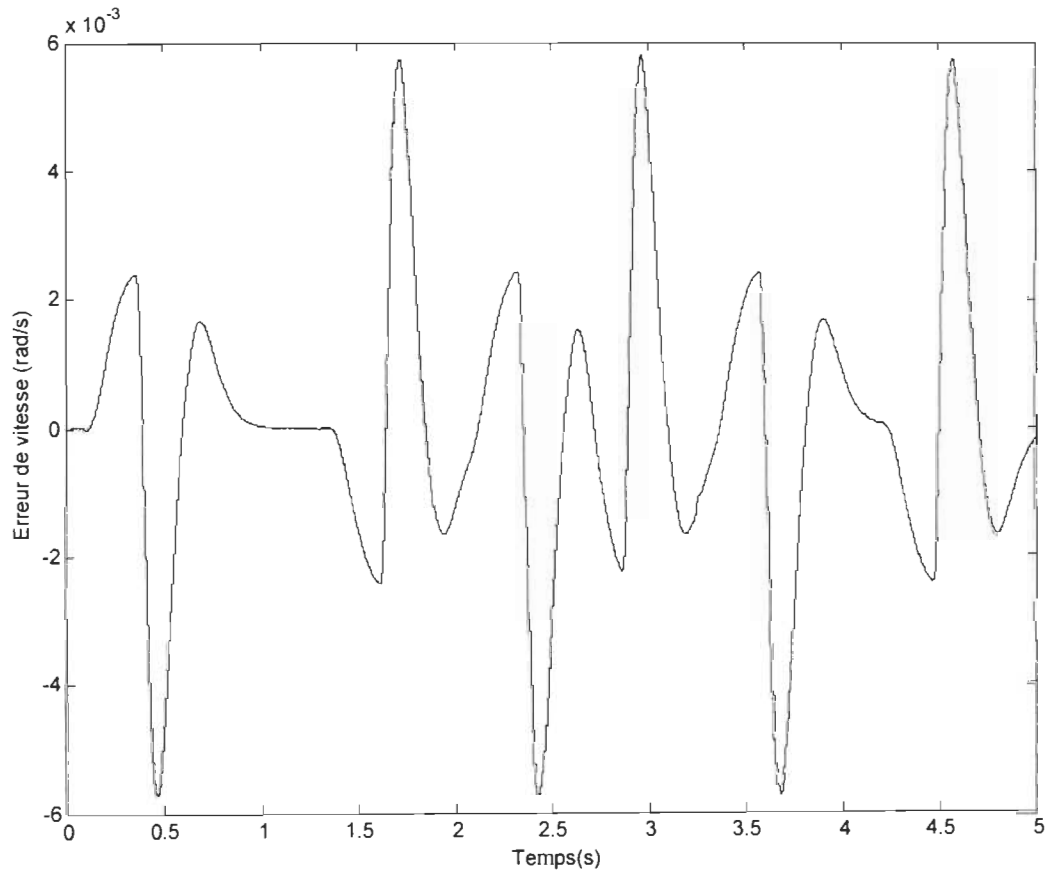


Fig.D.8 : Erreur de vitesse du moteur d'entraînement, modèle PSB(FR) avec une diminution de 50% de la charge

Programme MATLAB, modèle PSB, avec une augmentation de 50% de la charge

```
% les paramètres du système FR, le modèle PSB, avec une augmentation de 50% de la charge %
clear all
load vitesse
%temps d'échantillonnage
Tech=1e-6;
Ts=Tech;
% le coefficient du ressort du torsion
k=500;
```

```

%l'inertie de la charge
Jc=0.0357;
%l'inertie du moteur d'entraînement
Jm=Jc*3;
%l'inertie de la charge désirée
Jc1=Jc*5*1.5;
% frottement de la charge
Fc=0.003;
%frottement du moteur d'entraînement
Fm=Fc*4;
%frottement de la charge désirée
Fc1=Fc*3*1.5;
%l'inertie et frottement total
Jt=Jm+Jc;
Ft=Fm+Fc;
% les pulsations de coupure du système
w1=20;
w2=40;
% les coefficients du gain de contrôleur PI
Kp=(w1+w2)*Jt-Ft;
Ki=w1*w2*Jt;
%les coefficients du filtre dérivatif
af=3000;
bf=af;
%l'inertie et frottement du moteur d'entraînement et la charge désirée
Jt1=Jm+Jc1;
Ft1=Fm+Fc1;
%les coefficients du gain de contrôleur PD
Kpp=9;
Kd=0.05;
% simulation du système FR
sim('moteur1')
sim('moteur31')
%l'erreur du couple électromagnétique du moteur d'entraînement
e=Tem-Tem1;
equa=norm(e)
figure;
plot(t,e);
figure;
plot(t, Tem, t, Tem1, 'r');
%l'erreur de la vitesse du moteur d'entraînement
e1=omega-omegal;
equa=norm(e1)
figure;
plot(t,e1);
figure;

```

`plot(t,omega,t,omega1,'r')`

Résultats de simulation :

L'erreur de la vitesse du moteur d'entraînement entre le système FR et le système physique sans émulateur et avec les caractéristiques de la charge désirée sous PSB est présentée à la figure D.9.

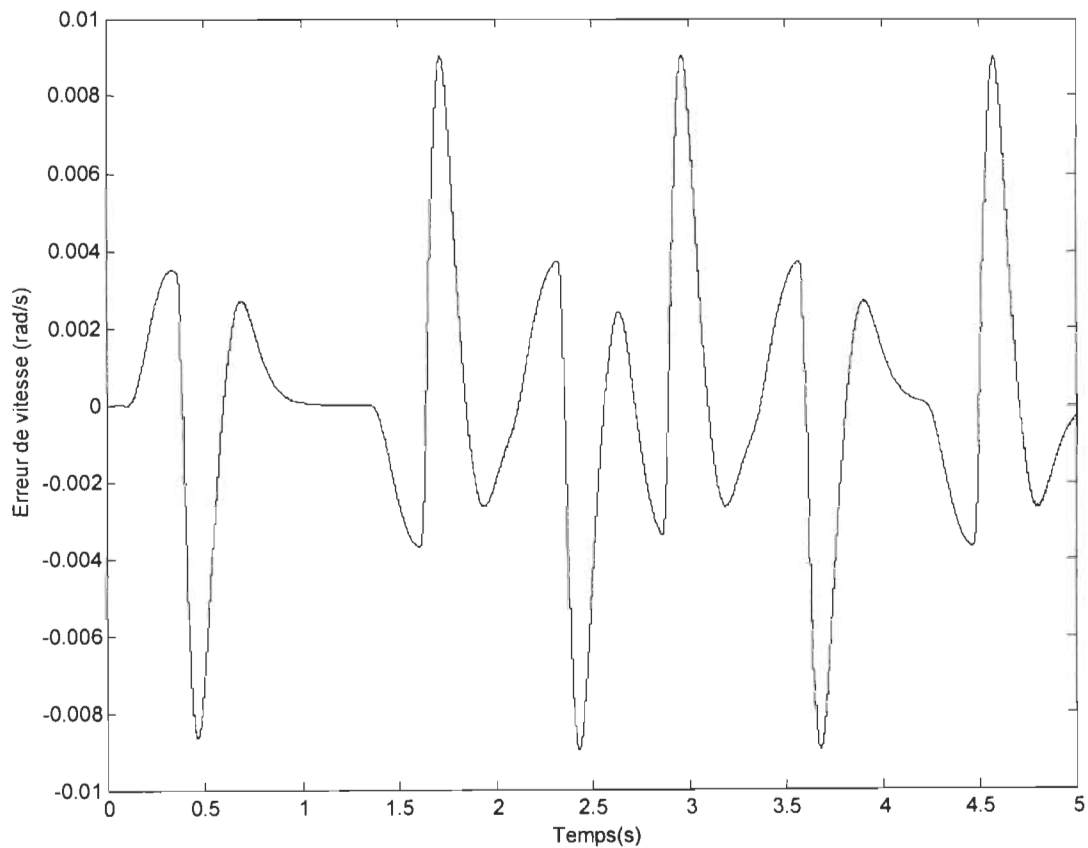


Fig.D.9 : Erreur de vitesse du moteur d'entraînement, modèle PSB(FR) avec une augmentation de 50% de la charge

Annexe E: Schémas et programmes de simulation du système Rigide-Flexible (RF) sur SimulinkTM, Matlab[®] et PSB.

E.1- Modèles linéaires pour le système RF:

1-1 Calcul de l'équation (4.27)(chapitre IV)

On considère une équation d'état tel que θ_M est l'entrée du système, θ_{C1} et $\dot{\theta}_{C1}$ les variables d'état. On a :

$$U = \theta_M, X_1 = \theta_{C1}, X_2 = \dot{\theta}_{C1}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{J_{C1}} & -\frac{F_{C1}}{J_{C1}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{k}{J_{C1}} \end{pmatrix} U \quad (E.1)$$

Pour avoir θ_{C1} comme sortie :

$$Y = (1 \ 0) \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} + (0)U \quad (E.2)$$

Le schéma général du système FR, utilisant les modèles linéaires, est illustré à la figure 4.9 du chapitre IV.

L'émulateur de charge du système RF est présenté à la figure 4.8 du chapitre IV.

Le modèle désiré dans l'émulateur de charge est représenté comme suit :

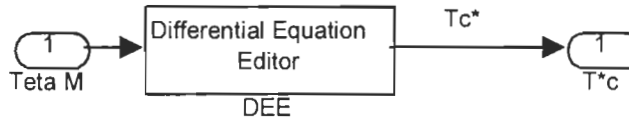


Fig.E.1 : Schéma du modèle désiré de l'émulateur de système RF

Le bloc DEE est décrit par les équations (E.1) et (E.2)

Le modèle réel dans l'émulateur de charge est représenté comme suit :

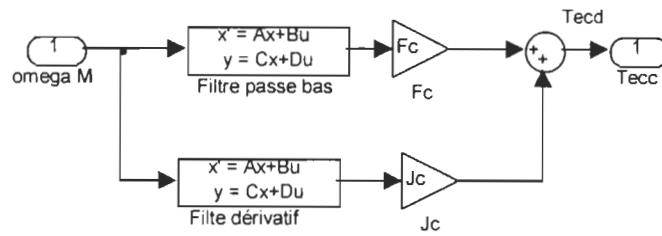


Fig.E.2 : Schéma du modèle réel de l'émulateur de système RF

Le filtre dérivatif dans la figure E.2 est le même filtre présenté dans la figure C.4.

Le filtre passe bas dans la figure E.2 est le même filtre présenté dans la figure C.5.

Le contrôleur proportionnel est représenté comme suit :

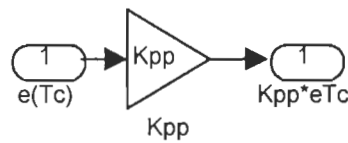


Fig.E.3 : Schéma du contrôleur proportionnel de l'émulateur de système RF

Le système avec couplage flexible sans émulateur et avec les caractéristiques du modèle désiré est illustré à la figure 4.10 du chapitre IV. Les paramètres du moteur d'entraînement et de la charge sont présentés à la figure E.4.

Block Parameters: Syst flexible

Subsystem (mask)

Parameters

constant, $K=$
k

Inertie de charge désirée, $J_{c1}=$
Jc1

Frottement de charge désirée, $F_{c1}=$
Fc1

Inertie du moteur, $J_m=$
Jm

Frottement du moteur, $F_m=$
Fm

OK Cancel Help Apply

Fig.E.4 : Paramètres du moteur d'entraînement et de la charge désirée, modèle linéaire RF

Programme MATLAB, modèle linéaire :

```
% les paramètres d'un système RF, pour le modèle linéaire %
clear all
load vitesse
%temps d'échantillonnage
Tech=1e-4;
% le coefficient du ressort du torsion
k=500;
%l'inertie de la charge
Jc=0.0357;
%l'inertie du moteur d'entraînement
Jm=Jc*3;
%l'inertie de la charge désirée
Jc1=Jc*5;
% frottement de la charge
Fc=0.003;
%frottement du moteur d'entraînement
Fm=Fc*4;
%frottement de la charge désirée
Fc1=Fc*3;
%l'inertie et frottement total
Jt1=Jm+Jc1;
Ft1=Fm+Fc1;
% les pulsations de coupure du système
```

```

w1=20;
w2=40;
% les coefficients du gain de contrôleur PI
Kp=(w1+w2)*Jt1-Ft1;
Ki=w1*w2*Jt1;
%les coefficients du filtre dérivatif
af=3000;
bf=af;
%les coefficients du gain du contrôleur P
Kpp=10;
% simulation du système RF
sim('moteur3')
sim('moteur33')
%l'erreur du couple électromagnétique du moteur d'entraînement
e=Tem-Tem1;
equa=norm(e)
figure;
plot(t,e);
%l'erreur de la vitesse du moteur d'entraînement
e1=omega-omega1;
equa=norm(e1)
figure;
plot(t,e1)

```


Résultats de simulation :

La figure E.5 présente l'erreur de la vitesse du moteur d'entraînement entre le système RF et le système physique sans émulateur avec les caractéristiques de la charge désirée en utilisant les modèles linéaires.

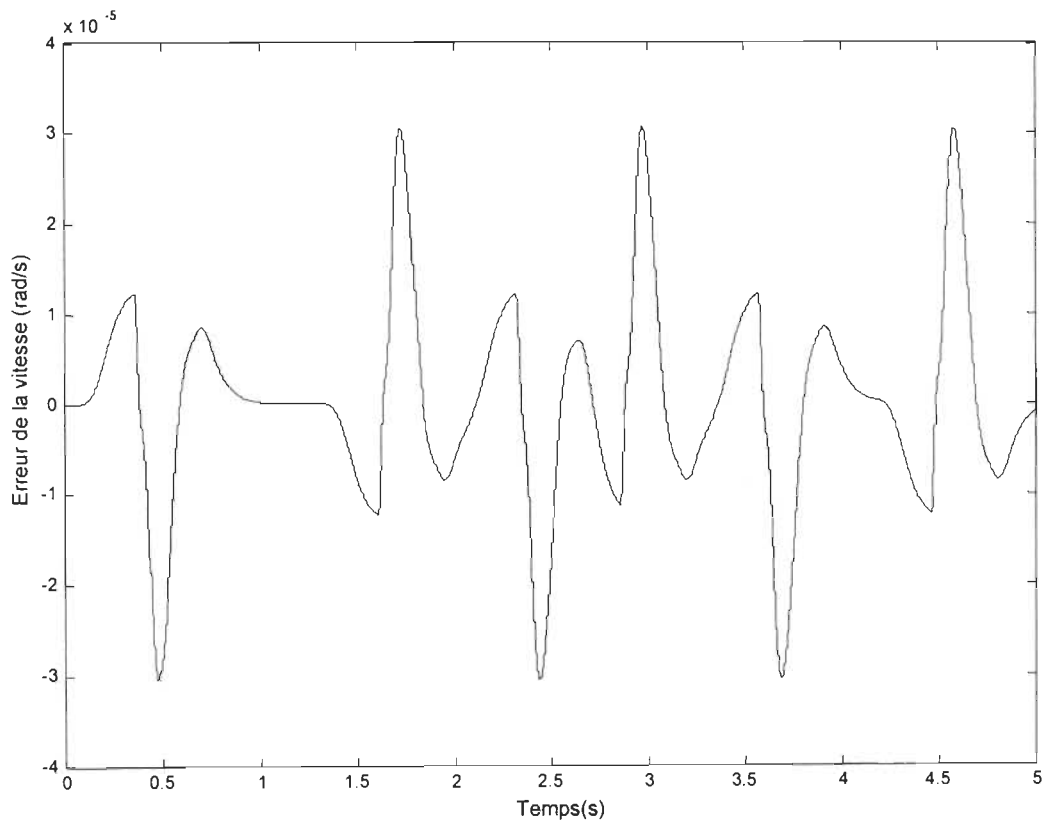


Fig.E.5 : Erreur de vitesse du moteur d'entraînement, modèle linéaire RF

E.2- Modèles complets sur PSB pour le système RF:

Le schéma général du système RF utilisant les modèles non-linéaires, est illustré à la figure 5.7 du chapitre V.

L'émulateur de charge du système RF, sous PSB est illustré à la figure E.6

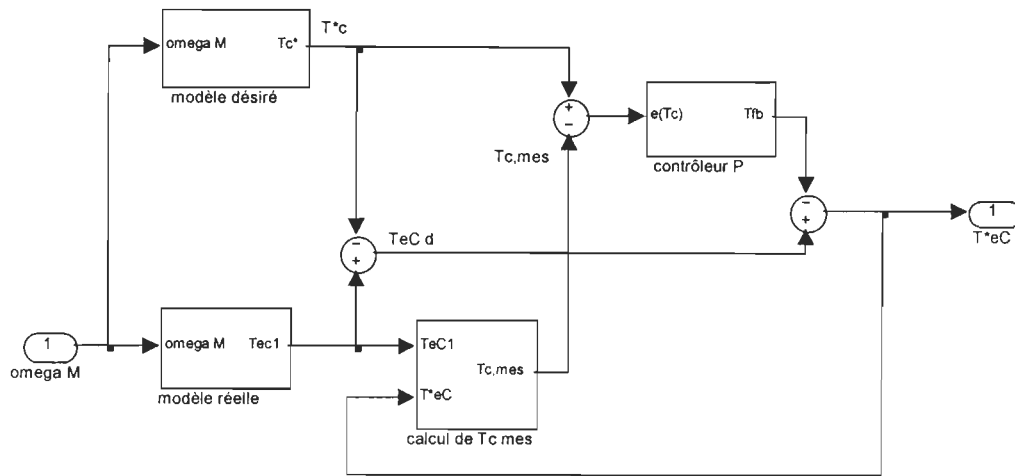


Fig.E.6 : Schéma de l'émulateur de charge pour le couplage RF, modèle PSB

Le modèle désiré, le modèle réel et le contrôleur proportionnel sont présentés aux figures E.1, E.2 et E.3 respectivement. Le calcul du couple mécanique mesuré est présenté à la figure C.7.

Dans le schéma général du système RF, nous avons utilisé le modèle du moteur d'entraînement dans PSB tel que présenté à la figure 3.8, et le modèle de la charge dans SIMUPELS tel que présenté à la figure B.4.

Les paramètres mécaniques de la charge, sont inclus dans moteur d'entraînement et exclus du moteur de charge tel que nous montre la figure C.8.

Le système avec couplage rigide sans émulateur et avec les caractéristiques du modèle désiré est illustré à la figure 5.10 du chapitre V.

Les paramètres du moteur d'entraînement sont présentés à la figure E.7.

Block Parameters: moteur

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor or squirrel cage) modeled in the dq rotor reference frame. Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point. Press help for inputs and outputs description.

Parameters

Rotor type:

Reference frame:

Nom. power, L-L volt. and freq. [Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz)]:

Stator [Rs(ohm) Lls(H)]:

Rotor [Rr(ohm) Llr(H)]:

Mutual inductance Lm (H):

Inertia, friction factor and pairs of poles [J(kg.m^2) F(N.m.s) p()]:

Initial conditions [s() th(deg) isa, isb, isc(A) pha, phb, phc(deg)]:

OK Cancel Help Apply

Fig.E.7 : Paramètres du moteur d'entraînement, modèle PSB

Les paramètres de la charge sont présentés à la figure E.8.

Block Parameters: charge

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor or squirrel cage) modeled in the dq rotor reference frame. Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point. Press help for inputs and outputs description.

Parameters

Rotor type:

Reference frame:

Nom. power, L-L volt. and freq. [Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz)]:

Stator [Rs(ohm) Lls(H)]:

Rotor [Rr'(ohm) Llr'(H)]:

Mutual inductance Lm (H):

Inertia, friction factor and pairs of poles [J(kg.m^2) F(N.m.s) p()]:

Initial conditions [s() th(deg) isa, isb, isc(A) pha, phb, phc(deg)]:

OK Cancel Help Apply

Fig.E.8 : Paramètres de la charge désirée, modèle PSB

La vitesse de consigne pour le modèle PSB est présentée à la figure 3.11.

Programme MATLAB, modèle non-linéaire

```
% les paramètres d'un système RF, pour le modèle linéaire %
clear all
load vitesse
%temps d'échantillonnage
Tech=1e-6;
Ts=Tech;
% le coefficient du ressort du torsion
k=500;
```

```

%l'inertie de la charge
Jc=0.0357;
%l'inertie du moteur d'entraînement
Jm=Jc*3;
%l'inertie de la charge désirée
Jc1=Jc*5;
% frottement de la charge
Fc=0.003;
%frottement du moteur d'entraînement
Fm=Fc*4;
%frottement de la charge désirée
Fc1=Fc*3;
%l'inertie et frottement total
Jt=Jm+Jc;
Ft=Fm+Fc;
%l'inertie et frottement du moteur d'entraînement et la charge désirée
Jt1=Jm+Jc1;
Ft1=Fm+Fc1;
% les pulsations de coupure du système
w1=20;
w2=40;
% les coefficients du gain de contrôleur PI
Kp=(w1+w2)*Jt1-Ft1;
Ki=w1*w2*Jt1;
%les coefficients du filtre dérivatif
af=3000;
bf=af;
%le coefficient du gain du contrôleur P
Kpp=10;
% simulation du système RF
sim('moteur1')      % Tem, omega
sim('moteur2')      % Tem1, omega1
%l'erreur du couple électromagnétique du moteur d'entraînement
e=Tem-Tem1;
equa=norm(e)
figure;
plot(t,e);
figure
plot(t,Tem,t,Tem1,'r')
%l'erreur de la vitesse du moteur d'entraînement
e1=omega-omega1;
equa=norm(e1)
figure;
plot(t,e1);
figure
plot(t,omega,t,omega1,'r')

```

Résultats de simulation :

L'erreur de la vitesse du moteur d'entraînement, entre le système RF et le système physique sans émulateur et avec les caractéristiques de la charge désirée sous PSB et SIMUPELS, est présentée à la figure E.9.

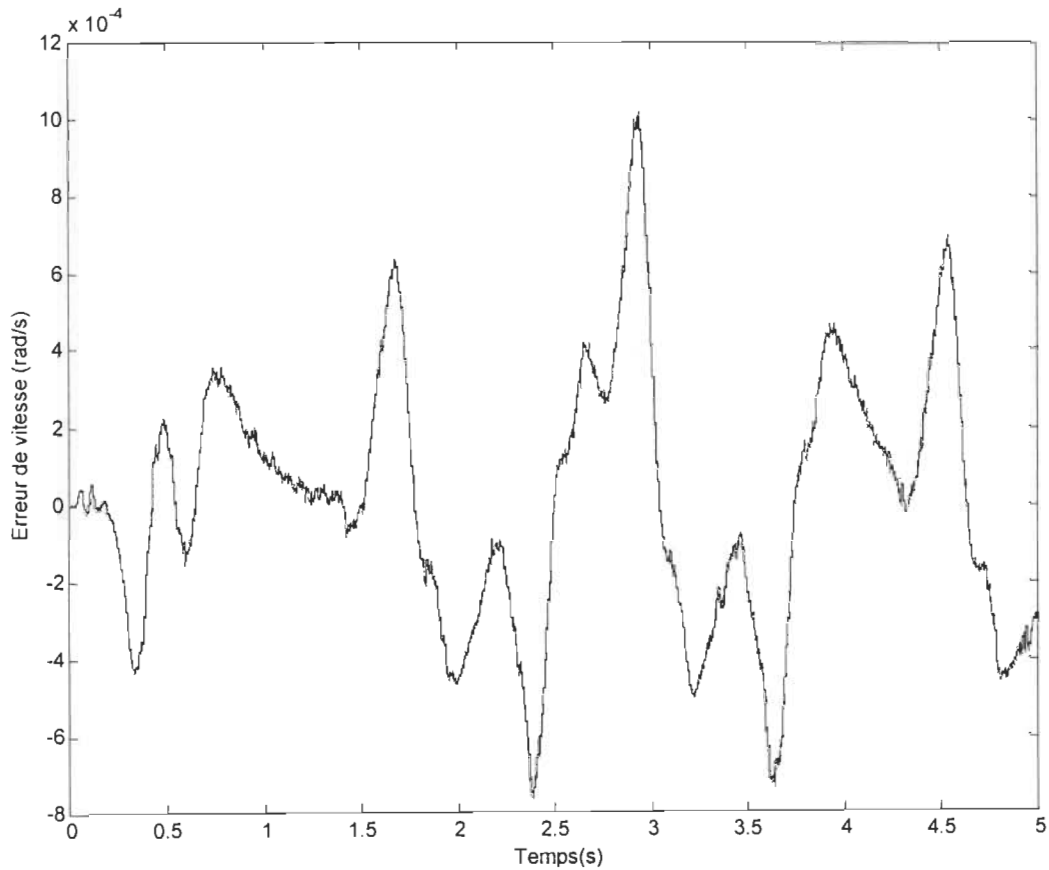


Fig.E.9 : Erreur de vitesse du moteur d'entraînement, modèle PSB (RF)

Annexe F: Schémas et programmes de simulation du système Flexible-Flexible (FF) sur SimulinkTM, Matlab[®] et PSB.

F.1- Modèles linéaires pour le système FF:

1-1 Calcul de l'équation (4.36) (chapitre IV)

On considère une équation d'état tel que θ_M est l'entrée du système et $(\theta_{C1}, \dot{\theta}_{C1})$ sont des variables d'état. Nous avons :

$$U = \theta_M, X_1 = \theta_{C1}, X_2 = \dot{\theta}_{C1}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k_1}{J_{C1}} & -\frac{F_{C1}}{J_{C1}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{k}{J_{C1}} \end{pmatrix} U \quad (F.1)$$

Pour avoir θ_{C1} comme sortie :

$$Y = (1 \ 0) \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} + (0)U \quad (F.2)$$

Le schéma général du système FF, utilisant les modèles linéaires, est illustré à la figure 4.13 du chapitre IV.

L'émulateur de charge du système FF est présenté à la figure 4.12 du chapitre IV.

Le modèle désiré et réel présents dans l'émulateur de charge sont illustrés à la figure F.1.

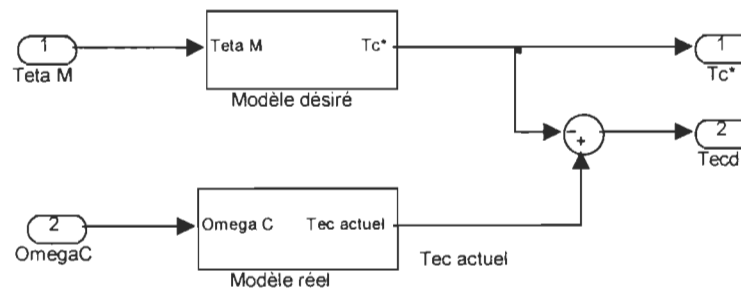


Fig.F.1 : Schéma du modèle réel et du modèle désiré de l'émulateur du système FF

Le modèle désiré est représenté comme suit :

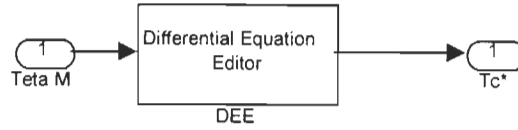


Fig.F.2 : Schéma du modèle désiré de l'émulateur du système FF

Le bloc DEE est décrit par les équations (F.1) et (F.2)

Le modèle réel est représenté comme suit :

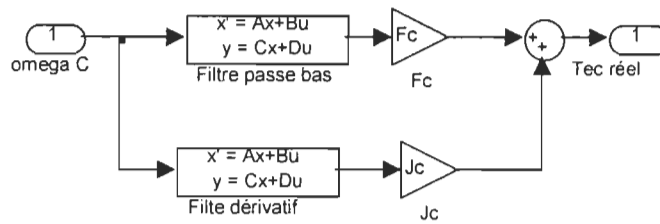


Fig.F.3 : Schéma du modèle réel de l'émulateur du système FF

Le filtre passe bas dans la figure F.3 est le même filtre présenté dans la figure C.5.

Le contrôleur PD est présenté comme suit :

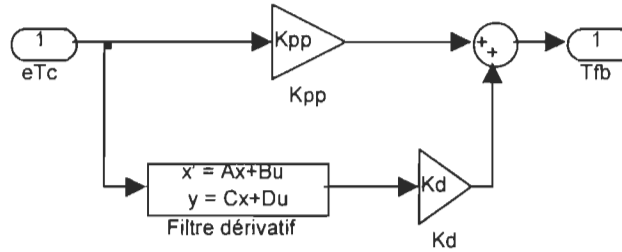


Fig.F.4 : Schéma du contrôleur PD de l'émulateur du système FF

Le filtre dérivatif dans les figure F.3 et F.4 est le même filtre présenté dans la figure C.4.

Le système avec couplage flexible sans émulateur et avec les caractéristiques et la flexibilité du modèle désiré est illustré à la figure 4.10 du chapitre IV. Les paramètres du moteur d'entraînement et de la charge sont présentés à la figure F.5.

Block Parameters: Syst flexible

Subsystem (mask)

Parameters

constant désirée, K1=

Inertie de charge désirée, Jc1=

Frottement de charge désirée, Fc1=

Inertie du moteur, Jm=

Frottement du moteur, Fm=

OK Cancel Help Apply

Fig.F.5 : Paramètres du moteur d'entraînement et de la charge désirée, modèle linéaire FF

Programme MATLAB, modèle linéaire :

```
% les paramètres d'un système FF, pour le modèle linéaire %
clear all
load vitesse
%temps d'échantillonnage
Tech=1e-4;
% le coefficient du ressort du torsion
k=500;
% le coefficient du ressort du torsion désiré
k1=100;
%l'inertie de la charge
Jc=0.0357;
%l'inertie du moteur d'entraînement
Jm=Jc*3;
%l'inertie de la charge désirée
Jc1=Jc*5;
% frottement de la charge
Fc=0.003;
%frottement du moteur d'entraînement
Fm=Fc*4;
%frottement de la charge désirée
Fc1=Fc*3;
```

```
%l'inertie et frottement total
Jt1=Jm+Jc1;
Ft1=Fm+Fc1;
% les pulsations de coupure du système
w1=20;
w2=40;
% les coefficients du gain de contrôleur PI
Kp=(w1+w2)*Jt1-Ft1;
Ki=w1*w2*Jt;
%les coefficients du filtre dérivatif
af=3000;
bf=af;
%les coefficients du gain du contrôleur PD
Kpp=0.5;
Kd=2;
% simulation du système FF
sim('moteur3')
sim('moteur4')
%l'erreur du couple électromagnétique du moteur d'entraînement
e=Tem-Tem1;
equa=norm(e)
figure;
plot(t,e);
%l'erreur de la vitesse du moteur d'entraînement
e1=omega-omega1;
equa=norm(e1)
figure;
plot(t,e1)
```

Résultats de simulation :

La figure F.6 présente l'erreur de la vitesse du moteur d'entraînement entre le système FF et le système physique sans émulateur avec les caractéristiques de la charge désirée en utilisant les modèles linéaires.

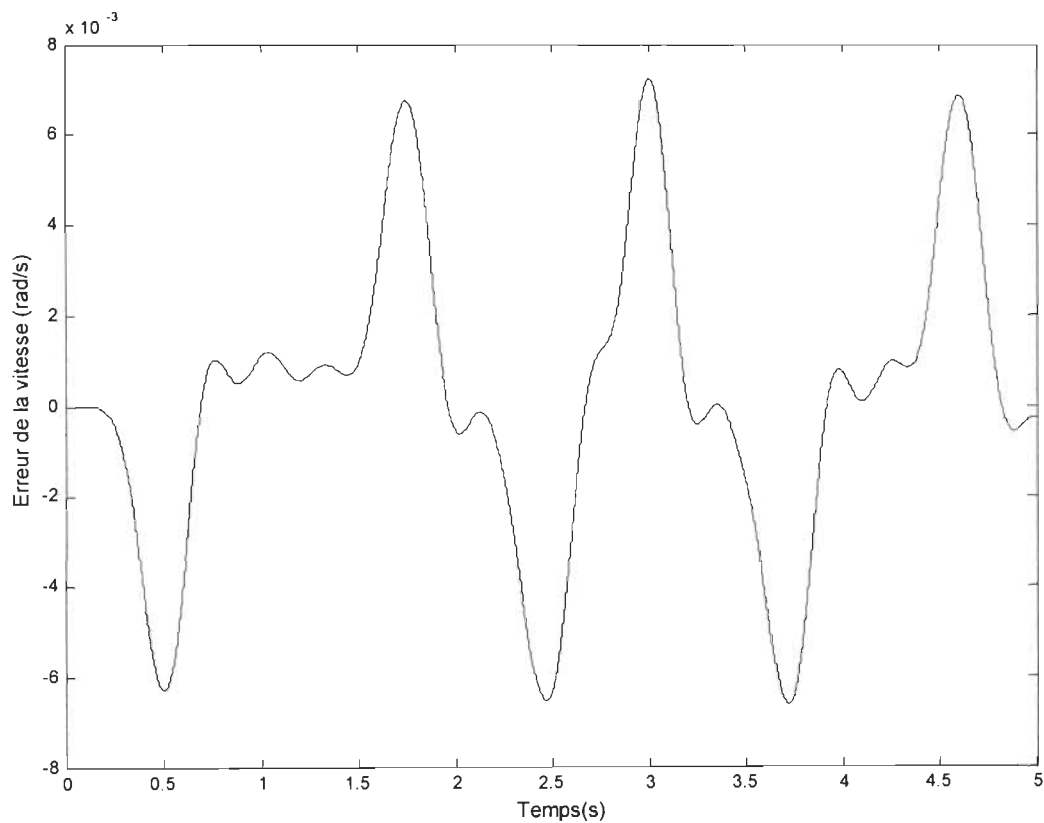


Fig.F.6 : Erreur de vitesse du moteur d'entraînement, modèle linéaire FF

F.2- Modèles complets sur PSB pour le système FF:

Le schéma général du système FF utilisant les modèles non-linéaires, est illustré à la figure 5.10 du chapitre V.

L'émulateur de charge du système FF, sous PSB est le même que celui utilisé dans le système linéaire illustré à la figure 4.12 du chapitre IV. Le modèle désiré, le modèle réel et le contrôleur PD sont présentés aux figures F.1, F.2, F.3 et F.4 respectivement. Le couple mécanique mesuré est calculé à partir de l'équation (4.14).

Dans le schéma général du système FF, nous avons utilisé le modèle du moteur d'entraînement et de la charge dans PSB tel que présenté à la figure 3.8.

La vitesse de consigne est représentée à la figure 3.11.

Programme MATLAB, modèle non-linéaire

```
% les paramètres d'un système FF, pour le modèle non-linéaire %
clear all
%temps d'échantillonnage
Tech=1e-6;
Ts=Tech;
% le coefficient du ressort du torsion
k=500;
% le coefficient du ressort du torsion désiré
kl=100;
%l'inertie de la charge
Jc=0.0357;
%l'inertie du moteur d'entraînement
Jm=Jc*3;
%l'inertie de la charge désirée
Jcl=Jc*5;
% frottement de la charge
Fc=0.003;
%frottement du moteur d'entraînement
Fm=Fc*4;
%frottement de la charge désirée
```

```

Fc1=Fc*3;
%l'inertie et frottement total
Jt=Jm+Jc;
Ft=Fm+Fc;
%l'inertie et frottement du moteur d'entraînement et la charge désirée
Jt1=Jm+Jc1;
Ft1=Fm+Fc1;
% les pulsations de coupure du système
w1=20;
w2=40;
% les coefficients du gain de contrôleur PI
Kp=(w1+w2)*Jt1-Ft1;
Ki=w1*w2*Jt1;
%les coefficients du filtre dérivatif
af=3000;
bf=af;
%les coefficients du gain du contrôleur PD
Kpp=2;
Kd=0.05;
% simulation du système FF
sim('moteur3')
sim('moteur4')
%l'erreur du couple électromagnétique du moteur d'entraînement
e=Tem-Tem1;
equa=norm(e)
figure;
plot(t,e);
%l'erreur de la vitesse du moteur d'entraînement
e1=omega-omegal;
equa=norm(e1)
figure;
plot(t,e1)

```

Résultats de simulation :

L'erreur de la vitesse du moteur d'entraînement entre le système FF et le système physique sans émulateur et avec les caractéristiques de la charge désirée sous PSB est présentée à la figure F.7.

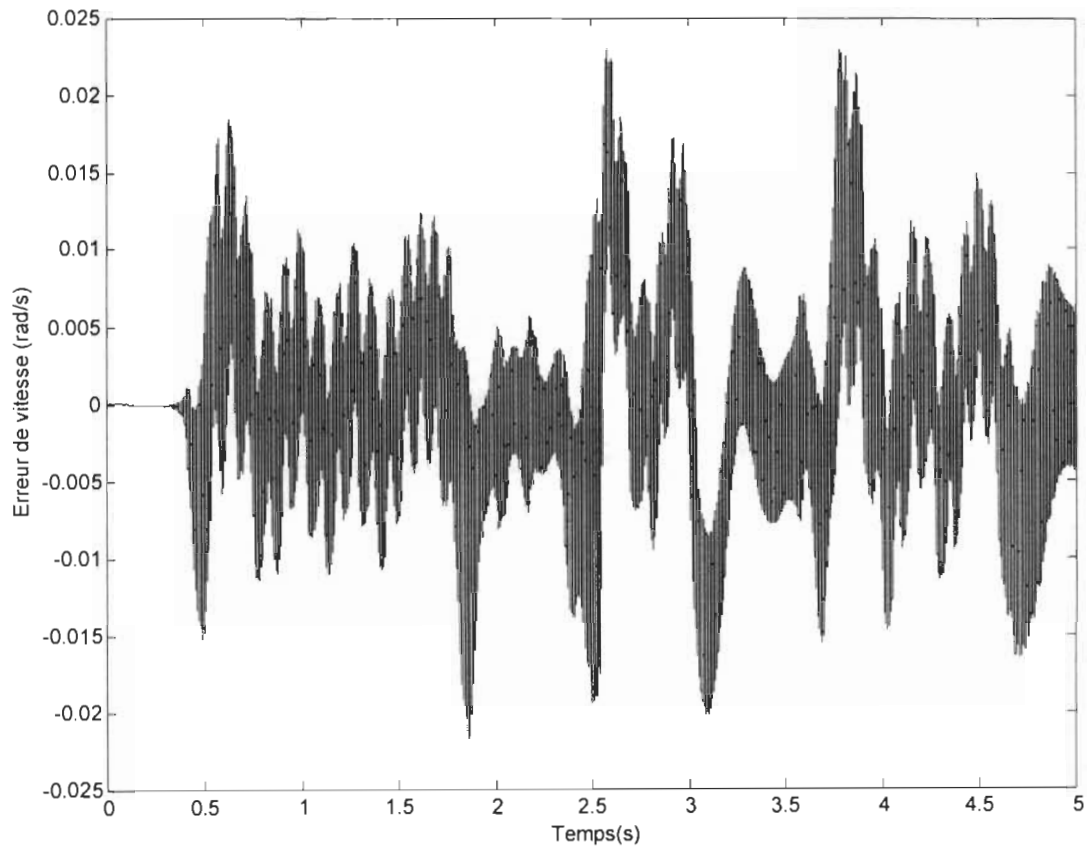


Fig.F.7 : Erreur de vitesse du moteur d'entraînement, modèle PSB (FF)